



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Análisis experimental de la hidrodinámica y calidad de las aguas en la Bahía del Fangar

Treball realitzat per:

**Yaiza Samper Garcia**

Dirigit per:

**MANEL ESPINO INFANTES i PABLO CERRALBO  
PEÑARROYA**

Màster en:

**Enginyeria Ambiental**

Barcelona, Juny de 2019

Departamento d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**



## Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a todas las personas que directa o indirectamente han formado parte de la realización de este trabajo que supone el fin de la vida universitaria para mí.

En primer lugar, quiero dar las gracias a Manuel Espino y Pablo Cerralbo, los tutores de este trabajo, quienes me han enseñado infinidad de cosas de un mundo que era casi desconocido para mí. Siempre atentos y dispuestos a resolver todas las dudas que me surgían (que no han sido pocas). Gracias por invertir tantas horas en ayudarme a sacar adelante y mejorar este trabajo y por la paciencia infinita que ha hecho falta para que aprendiera a usar (un poquito) Python.

También quiero dar las gracias a mis compañeros de clase por acompañarme durante estos dos largos años. Después de muchas horas de clase e innumerables cervezas, termino el máster teniendo unos amigos maravillosos. A Brunela, un pilar básico en mi vida.

A mi familia, mis padres, mi hermana, a quienes les debo todo lo que soy, gracias por confiar siempre en mi capacidad de salir adelante. A Asier, mi compañero de vida, quien siempre me apoya incondicionalmente, gracias.

## Resumen

En la bahía del Fangar, al noroeste del Delta del Ebro, se lleva a cabo una gran actividad agrícola (principalmente cultivo de arroz) y acuícola. Esta bahía se comporta como un estuario ya que recibe agua dulce desde los canales de desagüe de los campos de arroz, definiendo tres épocas en función de su ciclo de siembra: canales abiertos, canales semiabiertos y canales cerrados. Estas aportaciones de agua más dulce a la bahía influyen en su hidrodinámica y en la calidad del agua, lo que afecta de forma directa a la producción acuícola.

A lo largo de este trabajo se estudia la hidrodinámica y la calidad del agua de la bahía del Fangar y el Golfo de la Ampolla a partir de datos experimentales registrados durante la campaña llevada a cabo por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM-UPC) durante los meses de octubre y noviembre de 2018. A partir de este análisis se pretende caracterizar la hidrodinámica de la bahía en época de canales semiabiertos.

Tras el análisis, se identifica un patrón típico de circulación estuárica positiva con flujo de salida en superficie y entrada de agua salina por las capas inferiores. Los resultados reflejan la importancia de la acción del viento (sobre todo vientos de Mestral y de Gregal) y de las aportaciones de agua dulce como principales agentes que influyen en la hidrodinámica y calidad del agua de la bahía.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>II</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>3</b>
2.1. Delta del Ebro.....	3
2.2. Bahía del Fangar .....	7
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Material y metodología.....</b>	<b>11</b>
4.1. Introducción.....	11
4.2. Características de instrumentos y estaciones.....	13
4.3. Procesado de los datos .....	17
4.3.1. Meteorología .....	17
4.3.2. Caudales .....	18
4.3.3. Corrientes .....	21
4.3.4. Turbidez .....	22
4.3.5. Nivel del mar y seiches .....	23
4.3.6. Perfiles de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y turbidez .....	24
<b>5. Resultados .....</b>	<b>26</b>
5.1. Análisis de las series temporales .....	26
5.1.1. Meteorología .....	26
5.1.2. Caudales .....	32
5.1.3. Corrientes .....	33
5.1.4. Oleaje y turbidez.....	39
5.1.5. Temperatura en el fondo.....	41
5.1.6. Nivel del mar.....	42
5.1.7. Marea astronómica y marea meteorológica .....	43
5.2. Perfiles verticales .....	48

5.2.1.	Temperatura .....	48
5.2.2.	Salinidad .....	52
5.2.3.	Densidad .....	56
5.2.4.	Oxígeno disuelto .....	59
5.2.5.	Turbidez .....	62
<b>6.</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>65</b>
6.1.	Series temporales .....	65
6.2.	Perfiles verticales .....	70
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y futuras líneas de actuación .....</b>	<b>73</b>
<b>8.</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evolución de la producción de mejillones (t) en Cataluña (1998-2018). Fuente de los datos: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, Gobierno de España. ....	2
Figura 2 Localización de la bahía del Fangar. ....	4
Figura 3 Climograma de Baix Ebre para el periodo 1971-200. Origen de los datos: meteocat.....	5
Figura 4 Batimetría de la bahía del Fangar.....	7
Figura 5 Localización de las estaciones meteorológicas y de nivel, los equipos de medida de corriente y oleaje y el correntímetro del Trastellador. ....	11
Figura 6 Estación de bombeo de Illa de Mar. Se observan los cuatro tornillos de Arquímedes. (Street View, 2013). ....	12
Figura 7 Ubicación de los diferentes puntos de medida de los CTD los días 8 y 22 de noviembre.....	13
Figura 8 Esquema estación de medida del caudal del canal del Trastellador. Fuente: Informe Capanya Tardor (CIIRC). ....	15
Figura 9 Esquema del sistema de fondeo utilizado tanto en la estación de la Bahía como en la de Bocana. Fuente: Informe Capanya Tardor (CIIRC). ....	16
Figura 10 Modelo de sonda CTD (SBE 19plus V2 SeaCAT Profiler CTD) utilizado durante la campaña de recogida de datos los días 8 y 22 de noviembre de 2018 en la bahía del Fangar. Fuente: <a href="http://www.seabird.com">www.seabird.com</a> . ....	16
Figura 11 Esquema del Canal del Trastellador. Siendo: h, altura del canal; b, anchura del canal; y v velocidad de la corriente. ....	18
Figura 12 Cálculos para la dirección de las corrientes. ....	22
Figura 13 Secciones seleccionadas en el ODV para el análisis de los correspondientes parámetros registrados por el CTD. A, sección en el exterior; B, sección en la bocana; C, sección en el interior; D, sección transversal a lo largo de la bahía.....	26
Figura 14 Velocidad y dirección del viento registrados en la estación del puerto de la Ampolla (imagen superior) y en la Batea (imagen inferior). ....	27

Figura 15 Rosa de los vientos en la estación de Ampolla (izquierda) y Batea (derecha) del mes de noviembre de 2018. ....	28
Figura 16 Temperatura del aire registrada en la estación de Batea. ....	29
Figura 17 Pluviometría registrada en la estación del Perelló. ....	30
Figura 18 Mapas de precipitación acumulada (mm) en Cataluña. A, días 5-6; B, días 8-9; C, días 17-19; D, días 23-26; Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya. ....	31
Figura 19 Caudal aportado a la bahía del Fangar y temperatura del agua (°C) del canal del Trastellador durante el periodo de estudio. ....	33
Figura 20 Corrientes registradas en la zona de la bocana. Se presentan las velocidades (cm/s) en la capa más superficial (azul) y más profunda (negro). ....	34
Figura 21 Corrientes registradas en la zona exterior. Se presentan las velocidades (cm/s) en la capa más superficial (azul) y más profunda (negra). ....	34
Figura 22 Rosa de corrientes en superficie de la estación de Bocana (izquierda) y Exterior (derecha) durante el mes de noviembre de 2018. ....	35
Figura 23 Corrientes observadas en la bocana y en el exterior, en superficie (azul) y en el fondo (negro). ....	36
Figura 24 Diagramas de Hovmöller de las corrientes registradas en Bocana (A y B) y en Exterior (C y D). El eje Y presenta los metros desde el fondo, siendo la superficie 4 y 7 metros respectivamente. ....	38
Figura 25 Oleaje registrado en las estaciones de Bocana (azul) y Exterior (naranja). En primer lugar, se muestra la dirección de pico, en segundo el periodo pico y en tercero la altura significativa. ....	40
Figura 26 Turbidez (NTU) registrada por los sensores OBS y altura de ola significativa (m) en las estaciones de fondeo de Bocana (azul) y Exterior (naranja). ....	41
Figura 27 Temperatura de fondo en Bocana (4 metros) y en Exterior (7 metros). ....	42
Figura 28 Variación del nivel del mar en la Bahía del Fangar y el Golfo de la Ampolla. Estas oscilaciones se han calculado en función del nivel medio del agua en cada punto. ....	43
Figura 29 Componente de marea astronómica, corresponde con la variación del nivel del mar producida por las fuerzas de atracción gravitatoria en Batea. ....	44

Figura 30 Serie temporal de marea meteorológica en la estación Bocana, representa el valor residuo una vez eliminadas las mareas astronómicas. En rojo se identifican los periodos de seiches más intensas. ....	46
Figura 31 Episodios de seiches significativas durante el periodo de estudio. ....	47
Figura 32 Perfiles de temperatura (°C) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22. ....	48
Figura 33 Arriba: temperatura en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: temperatura en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre.....	50
Figura 34 Arriba: temperatura en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: temperatura en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre.....	51
Figura 35 Perfiles de salinidad (PSU) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22. ....	52
Figura 36 Arriba: salinidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre .....	54
Figura 37 Arriba: salinidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre .....	55
Figura 38 Perfiles de densidad (kg/m <sup>3</sup> ) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22. ....	56
Figura 39 Arriba: densidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre .....	57
Figura 40 Arriba: densidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre. ....	58

Figura 41 Perfiles de oxígeno disuelto (mg/l) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22. ....	59
Figura 42 Arriba: oxígeno disuelto (mg/l) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: oxígeno disuelto en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre .....	60
Figura 43 Arriba: oxígeno disuelto (mg/l) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: oxígeno disuelto en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre .....	61
Figura 44 Perfiles de turbidez (FTU) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22. ....	62
Figura 45 Arriba: turbidez (FTU) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: turbidez en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre.....	63
Figura 46 Arriba: turbidez (FTU) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: turbidez en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre.....	64
Figura 47 Presión atmosférica (hPa) en Batea durante el noviembre de 2018. ....	66
Figura 48 Comparativa marea meteorológica y presión atmosférica en la bahía del Fangar durante el mes de noviembre. ....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de la superficie total del delta del Ebro. Fuente: Problemática del Río Ebro en su tramo final (J.M Franquet, M.A. Albacar, F. Tallada). .....	3
Tabla 2 Instrumentos y características de la estación meteorológica de la Ampolla. ....	14
Tabla 3 Instrumentos y características de la estación meteorológica de Batea. ....	14
Tabla 4 Instrumentos y características de la estación del Trastellador. ....	14
Tabla 5 Instrumentos y características de los equipos sumergidos en la Bocana (Fangar). .....	15
Tabla 6 Instrumentos y características de los equipos sumergidos en el Golfo de la Ampolla.....	15
Tabla 7 Medidas realizadas en el Canal del Trastellador para un posterior cálculo del caudal. El concepto “sección 0” corresponde con la sección medida en un momento concreto; p0 indica la profundidad en el momento de la medida.....	19
Tabla 8 Precipitación acumulada (mm) en Baix Ebre y Montsià. ....	31
Tabla 9 Componentes armónicos principales. ....	45

## 1. Introducción

El Delta del Ebro, ubicado en la provincia de Tarragona, es el hábitat acuático más extenso de Cataluña. Presenta gran variedad de ambientes naturales como ríos, bahías, playas, dunas, islas... Juntamente con los arrozales, constituye un ambiente complejo de gran biodiversidad. Esta complejidad viene dada por la constante transformación que sufre la zona, inducida por agentes meteorológicos, por corrientes marinas, oleaje y por la aportación de agua dulce resultante de la actividad humana.

En el Delta del Ebro se distinguen dos lagunas costeras: la bahía de los Alfacs y la bahía del Fangar, en la que se centra este trabajo. Se trata de la bahía ubicada en el hemidelta norte, entre la localidad de la Ampolla y la desembocadura del río Ebro. La poca profundidad de la bahía, la climatología de la región y el aporte de nutrientes a través del agua dulce procedente del riego, la convierten en una zona de alta productividad acuícola [1]. Ambas bahías pueden considerarse estuarios, puesto que un estuario se entiende como “un cuerpo de agua costero semicerrado con libre circulación de agua del océano, dentro del cual el agua salada se diluye con agua procedente del drenaje de la tierra” [2].

A pesar de sus características idóneas para el cultivo de moluscos, pueden surgir problemas en la calidad del agua que provoquen una disminución de la producción [3]. Por ejemplo, a principio de los setenta, su capacidad productiva se redujo notablemente de forma paralela al auge de los usos agrícolas intensivos y a su eutrofización [4]. Actualmente parece que se ha iniciado un proceso de recuperación en algunas de las lagunas del delta, hecho que puede deberse al control de los productos fitosanitarios llevado a cabo por la administración juntamente con la sensibilización del agricultor y ciertos modelos de gestión auspiciados al unísono por el Parque Natural, pescadores y cazadores [5].

Según datos de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Cataluña es la segunda comunidad española productora de mejillones por detrás de Galicia. En 2018, se



alcanzaron las 3.201 toneladas, que corresponden a un valor de más de 3.6 millones de euros (Generalitat de Catalunya). Por tanto, la disminución de la producción de mejillones supone una pérdida económica importante para la región. A pesar de que no toda la producción de mejillones se lleva a cabo en el delta del Ebro, es la principal región catalana donde se realiza esta actividad. El siguiente gráfico resume la evolución de la producción de mejillones en los últimos 20 años en Cataluña.

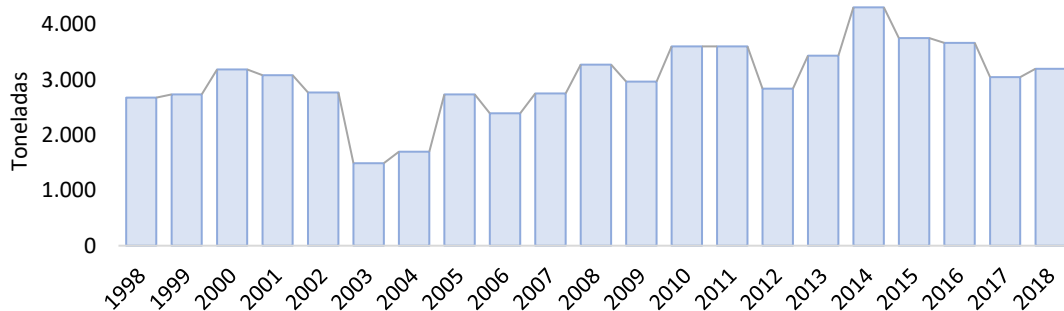


Figura 1 Evolución de la producción de mejillones (t) en Cataluña (1998-2018). Fuente de los datos: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, Gobierno de España.

Tal como se puede observar, hay años en los que la producción se ha reducido con respecto a sus años anteriores. En las bahías del delta del Ebro, estas variaciones pueden ser consecuencia, por un lado, de la regulación del caudal del río Ebro, el uso de pesticidas en los cultivos de arroz y las altas temperaturas que alcanza el agua en la época de canales abiertos (abril-octubre) [1]. Por otro lado, señalar que las actividades acuícolas pueden verse afectadas por la presencia de seiches en la zona. Suelen ser fenómenos con un ascenso y descenso del nivel del mar de unos 20-30 centímetros, con una periodicidad de 3 o 4 horas según la bahía, y que comportan la aparición de unas corrientes marinas asociadas, que pueden provocar pérdidas en la explotación de las mejilloneras [6].

Por este motivo, los últimos años se han realizado una serie de estudios científico-técnicos a partir de campañas de campo conjuntas entre el IRTA (Institut de Recerca i Tecnologies Agroalimentàries) y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña (LIM-UPC). Dichas campañas han destacado la importancia de

profundizar con mayor detalle en el estudio de la dinámica del delta. Concretamente, es importante identificar y valorar las aportaciones de agua dulce para examinar su influencia en la dinámica de la bahía; y la interacción de la Bahía con zonas más expuestas como el golfo de la Ampolla.

La caracterización de la hidrodinámica de la bahía del Fangar en época de canales semiabiertos, la identificación de las aportaciones de agua dulce de los canales de riego de los arrozales y la relación entre el comportamiento hidrodinámico de la bahía con la zona del golfo de la Ampolla son los principales objetos de este trabajo, que se basa en la campaña de medidas llevada a cabo durante los meses de octubre – noviembre de 2018 en la Bahía del Fangar y el golfo de la Ampolla.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Delta del Ebro

El delta del Ebro conforma una superficie de 320 Km<sup>2</sup> aproximadamente, lo que le convierte en la segunda zona húmeda más importante del Mediterráneo Occidental (después de la Camarga) y también la segunda del estado español después de Doñana [5]. Presenta forma de triángulo, cuya base corresponde a la Carretera nacional 340 y cuyo vértice opuesto se adentra 25 km en el mar Mediterráneo [7]. Destacan dos flechas laterales que cierran parcialmente dos bahías, la del Fangar y la de los Alfacs. La superficie total del delta se distribuye de la siguiente forma:

*Tabla 1 Distribución de la superficie total del delta del Ebro. Fuente: Problemática del Río Ebro en su tramo final (J.M Franquet, M.A. Albacar, F. Tallada).*

<b>Delta izquierdo</b>	119.22 Km <sup>2</sup>
<b>Delta derecho</b>	186.46 Km <sup>2</sup>
<b>Islas</b>	14.91 Km <sup>2</sup>
<b>TOTAL DELTA</b>	320.59 Km <sup>2</sup>

Al presentar una extensión tan importante, el delta abarca dos comarcas distintas, el Baix Ebre y Montsià, así como siete municipios: l'Aldea, l'Ampolla, Amposta, Camarles, Deltebre, Sant Carles de la Ràpita y Sant Jaume d'Enveja.

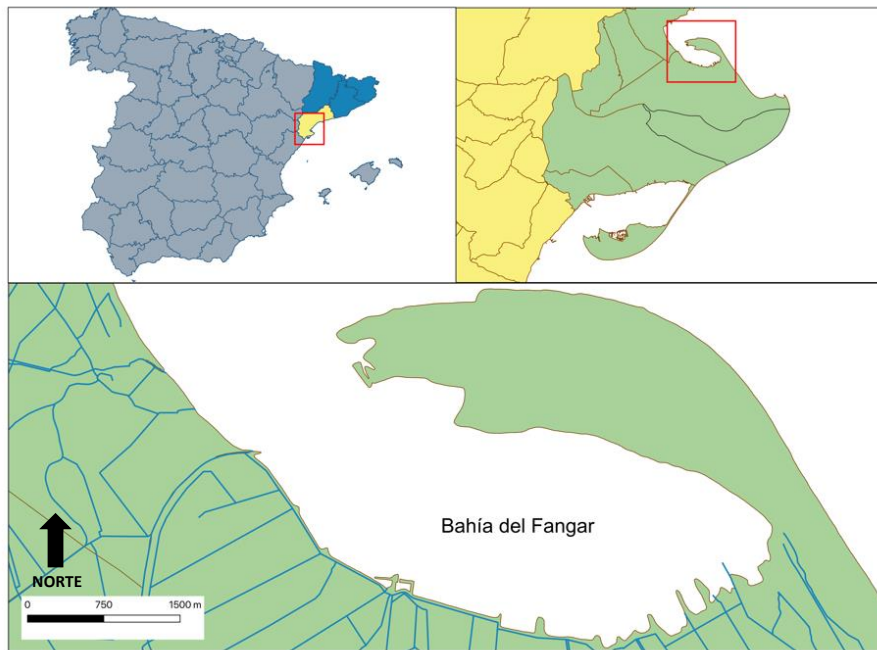


Figura 2 Localización de la bahía del Fangar.

En cuanto a la topografía, tal como la mayoría de los deltas del mundo, el delta del Ebro es extremadamente plano. Únicamente un 10% de la superficie total supera los 2 metros de altura, el 30% se sitúa entre 1 y 2 metros y el 60% restante tiene una altitud inferior a 1 metro [7]. Con dicha configuración, los vientos influyen considerablemente en la dinámica del delta.

Es importante hacer mención al clima de la región, ya que el comportamiento estuárico está muy influenciado por las condiciones ambientales. El clima del delta del Ebro es, según la clasificación climática de *Koppen*, Mediterráneo con verano cálido (*Csa*). Según la serie de datos analizada para el periodo 1971 – 2000, la comarca del Baix Ebre presenta una temperatura media anual de 17,4°C y una precipitación de 529 mm/año (Servei Meteorològic de Catalunya). Tal como se puede observar en el climograma de la Figura 3, se produce una oscilación térmica anual importante, alcanzando medias mensuales de 25°C los meses más calurosos y de 10°C durante el invierno. En cuanto a la precipitación, presenta un patrón de distribución bastante irregular a lo largo del año: el verano es generalmente seco, con valores medios de 10mm mensuales, mientras que

en primavera y otoño pueden producirse precipitaciones importantes alcanzando los 75mm.

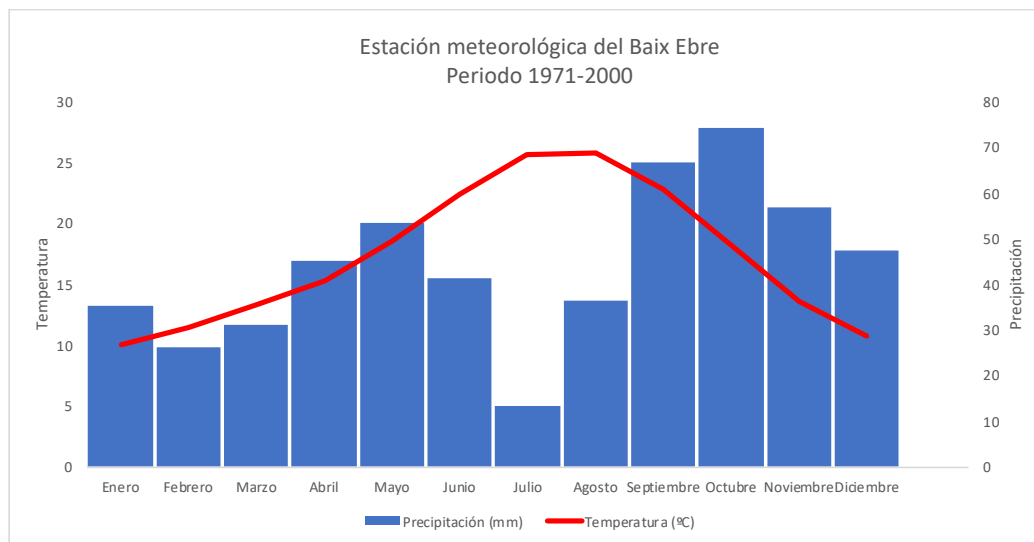


Figura 3 Climograma de Baix Ebre para el periodo 1971-200. Origen de los datos: meteocat.

Puesto que el río Ebro tiene una longitud de 910 Km [7], es importante tener en cuenta las precipitaciones que se producen más allá del delta. Es decir, aunque no haya llovido en las regiones cercanas, el delta puede verse afectado por las precipitaciones que se producen kilómetros río arriba.

Sin embargo, el fenómeno meteorológico más destacable es el viento. Normalmente procede del norte y noroeste (más seco), llamado viento de Tramuntana y viento de Mestral respectivamente. También son importantes los procedentes del este y noreste, llamado vientos de Levante y Gregal [3]. El Valle del Ebro afecta notablemente a los vientos de la zona, sobretodo a los de Mestral, ya que canaliza los vientos y se intensifican.

En cuanto a las bases que rigen la economía de la zona, la principal actividad humana en el Delta es el cultivo del arroz, que a su vez juega un papel muy importante en la ecología deltaica. Los terrenos dedicados al cultivo del arroz ocupan cerca del 65% de la llanura deltaica [3], produciendo el 98% de la producción total en Cataluña (Generalitat de Catalunya). Otro sector importante es la acuicultura y la pesca, aunque en los últimos

años está en retroceso como resultado del empeoramiento de la calidad del agua. Destaca el cultivo de mejillones (*Mytilus Galloprovincialis*) y ostras (*Crassostrea giga*).

El cultivo del arroz ha modificado la dinámica natural del delta, ya que, para llevar a cabo la actividad, es necesaria una red de irrigación que inunde y desagüe los campos en función del ciclo de siembra del arroz. Por lo tanto, en el cultivo del arroz se distinguen tres periodos: época de canales abiertos; canales semiabiertos; y canales cerrados. Además, estos humedales artificiales sirven como estancia para aves migratorias procedentes de la Camarga Francesa en su camino hacia las marismas del Guadalquivir y el Parque Nacional del Doñana [7].

Como consecuencia de la actividad humana, tanto en el delta como a lo largo del recorrido del río Ebro, se pueden distinguir diferentes problemáticas a las que se trata de hacer frente desde hace décadas: erosión natural marina, subsidencia y subida del nivel del mar; intrusión salina, un fenómeno natural potenciado por la disminución del caudal del río; eutrofización, atribuida al aumento del uso de fertilizantes para los campos de cultivo; contaminación por vertidos puntuales; etc. Sin embargo, el principal problema es el control de caudal a través de los embalses a lo largo del río, estos acumulan sedimentos e impiden que el agua los arrastre a lo largo de su recorrido hasta el mar.

Con tal de intentar frenar la degradación de los ecosistemas naturales del Delta, en 1983 los habitantes de Deltebre llevaron a cabo una manifestación pacífica que terminó en la creación del Parque Natural del Delta del Ebro. Después de sucesivas ampliaciones y modificaciones, actualmente la superficie del Delta cuenta con diferentes figuras de protección: parque natural, zona de especial protección para las aves (ZEPA) y Convenio Ramsar (humedales considerados de importancia internacional). Además, la Generalitat de Catalunya inició en 2003 un Plan de Gestión con la finalidad de definir las principales líneas de actuación para conservar el patrimonio natural y potenciar el desarrollo sostenible de la región.

## 2.2. Bahía del Fangar

Gracias a la interacción de los sedimentos fluviales del río, las corrientes marinas y el transporte longitudinal de sedimentos, se formaron dos barreras sedimentarias paralelas a la costa, dando lugar a masas de agua confinadas: la bahía del Fangar y la bahía de los Alfacs. Estas “flechas” litorales quedan unidas al cuerpo del delta por playas, dando lugar a sistemas semicerrados que comunican con el mar y reciben aportaciones de agua dulce desde la llanura deltaica [8].

La bahía del Fangar, zona en la que se basa este estudio, se ubica al noroeste de la desembocadura del río Ebro, en el Golfo de la Ampolla. La superficie de la bahía es de 12 Km<sup>2</sup> y contiene un volumen de agua aproximado de  $16 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. La profundidad media se sitúa entorno a los 2 metros llegando a alcanzar los 4 dentro de la bahía y hasta 7 en el Golfo de la Ampolla. La bocana de la bahía mide aproximadamente 1 Km de ancho y está orientada hacia el noroeste, hecho determinante durante episodios de viento de Mestral [8].

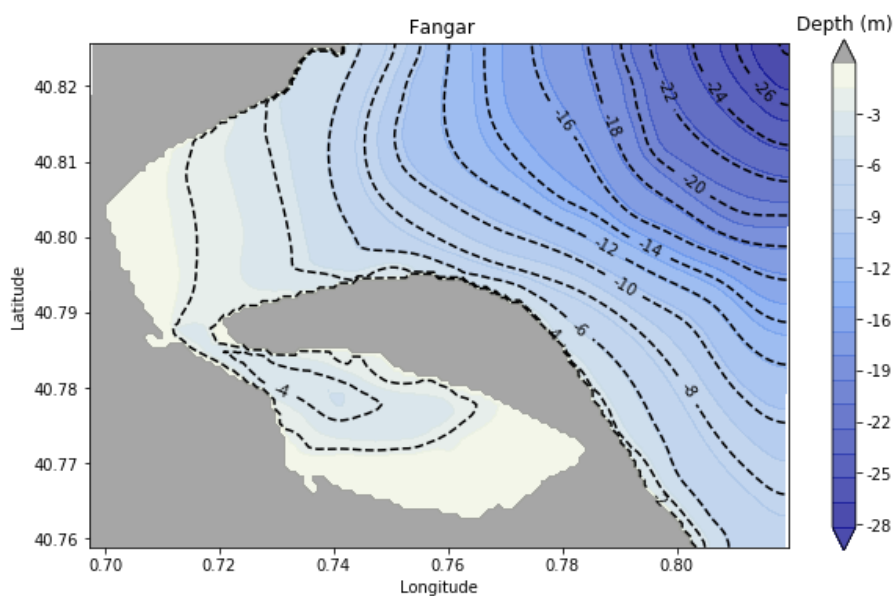


Figura 4 Batimetría de la bahía del Fangar.

La llanura deltaica cuenta con dos canales principales: el canal de la izquierda y el canal de la derecha con respecto al río. Estos canales captan agua directamente del río Ebro a

unos 60 km de la desembocadura y se dividen jerárquicamente en otros canales secundarios para llevar agua dulce a los campos.

El cultivo del arroz necesita de irrigación continua para reducir la salinidad del suelo, esto implica un caudal de agua dulce continuo entrando en la parcela de cultivo y saliendo por el desagüe para acabar en mar abierto o en las bahías, creando de esta forma un circuito abierto durante la época de canales abiertos (de abril a octubre). Concretamente, en la bahía del Fangar se estima una aportación anual media que puede variar entre 470 y 630 hm<sup>3</sup> al año [1]. La época de canales semiabiertos comprende de octubre a diciembre y la de canales cerrados, de diciembre a marzo, cuando la aportación de agua dulce de los canales a la bahía es prácticamente cero.

A pesar de que estos aportes de agua representan menos del 5% de lo que el río aporta al mar, gracias al confinamiento y al efecto del estuario, las bahías alcanzan niveles de producción biológicas 10 veces superiores, por unidad de volumen, a las del mar circundante. Esto se debe al equilibrio existente entre los aportes nutritivos del agua procedente del riego y la tasa de renovación del agua, es decir, el tiempo que residen estos nutrientes en la bahía antes de salir al mar [5].

La circulación de las masas de agua en los estuarios depende principalmente del caudal aportado, de las ondas de marea, las condiciones atmosféricas y de la velocidad y dirección del viento [9]. En la bahía del Fangar, el fraccionamiento espacial y temporal de los caudales, junto con la favorable relación superficie-volumen y un régimen de vientos adecuados, producen una mezcla eficaz que hace que cada metro cúbico de agua dulce que entra genere una circulación unas diez veces mayor, situando su tiempo medio de renovación entre 2 y 10 días [5].

Es importante tener en cuenta los episodios de seiches más intensos, ya que pueden llegar a afectar a las instalaciones ubicadas en la costa, así como a las bateas de la bahía. Estas oscilaciones son ondas largas con la misma escala temporal y espacial que los

tsunamis y provocan efectos destructivos parecidos en la costa [6]. A diferencia de los tsunamis, su generación no se da a partir de un forzamiento sísmico, sino que aparecen cuando coinciden de forma extrema determinados factores atmosféricos y efectos de resonancia [10].

Debido a su complejidad e importancia tanto económica como ecológica, durante los últimos años se han publicado diferentes tesis sobre aspectos muy variados del Delta del Ebro. Los temas de dichas investigaciones abarcan desde la hidrografía de su tramo final [11] y el análisis de los sedimentos de las bahías [12]; hasta la interacción de los arrozales con el medio [13].

La bahía del Fangar, al igual que la bahía de los Alfacs, al tratarse de un estuario con propiedades peculiares por la aportación de agua procedente de los arrozales, ha sido objeto de numerosos estudios, tanto referentes a su hidrografía [8], como a la capacidad productiva del medio acuático [5]. Por otro lado, también se han publicado multitud de documentos referentes a las diferentes problemáticas a las que se afronta el delta [7].



### 3. Objetivos

Conociendo la importancia de la bahía del Fangar en el desarrollo económico y ecológico de la zona y la relación que existe entre las actividades agrícolas y el agua de dicha bahía, el principal objetivo de este trabajo es conocer, entender y describir los factores que condicionan la hidrodinámica y calidad del agua en esta bahía durante la época de canales semiabiertos.

Con tal de alcanzar el objetivo principal, se han establecido una serie de objetivos más específicos:

- I. Conocer las características ambientales de la bahía del Fangar.
- II. Calcular una aproximación de las aportaciones de agua dulce desde los canales de riego de los arrozales.
- III. Analizar las características hidrodinámicas de la bahía: corrientes, oleaje, turbidez y temperatura.
- IV. Examinar la relación entre los vertidos de agua dulce y la dinámica y calidad del agua de la bahía.
- V. Relacionar el comportamiento hidrodinámico de la bahía con la zona del Golfo de la Ampolla.
- VI. Identificar los posibles episodios de seiches y los mecanismos que las generan.
- VII. Estudiar las distribuciones de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y turbidez en la columna de agua en dos momentos diferentes del mes de noviembre.

#### 4. Material y metodología

##### 4.1. Introducción

Los datos utilizados para la elaboración de esta tesina son el resultado de la campaña de medidas llevada a cabo por LIM/UPC en la Bahía del Fangar durante los meses de octubre y noviembre de 2018. Esta campaña se realizó en el marco del proyecto nacional Ecosistema-BC (CTM 2017-84275-R MINECO/FEDER, UE).

La campaña se inició el 16 de octubre de 2018 con la instalación de dos estaciones meteorológicas y de nivel del mar. Tal como se muestra en la Figura 5, la ubicación de las estaciones meteorológicas y de nivel se dispuso de forma que una de ellas se ubicara en la zona del interior de la bahía y la otra en el exterior, en el Golfo de la Ampolla. Para el cálculo del caudal del canal del Trastellador se instaló el mismo día un correntímetro en su desembocadura.



*Figura 5 Localización de las estaciones meteorológicas y de nivel, los equipos de medida de corriente y oleaje y el correntímetro del Trastellador.*

Existen dos estaciones de bombeo que evacúan el agua de los canales y la vierten en la bahía del Fangar: Illa de Mar, ubicado al lado del puerto de Illa de Mar; y Bassa de les Olles, en la laguna Bassa de les Olles. Con tal de poder cuantificar este caudal de agua

dulce, se solicitó a la comunidad de regantes que anotaran las horas de funcionamiento de los tornillos de Arquímedes para así poder calcularlo posteriormente. Estos tornillos se utilizan para bombear agua o fluidos entre superficies a diferente nivel o cota. En este caso, elevan el agua desde los canales de desagüe hasta los canales que finalmente evacúan el agua en las bahías. En la Figura 6 se recoge a modo de ejemplo una imagen de la estación de bombeo de Illa de Mar.



*Figura 6 Estación de bombeo de Illa de Mar. Se observan los cuatro tornillos de Arquímedes. (Street View, 2013).*

En cuanto a los equipos de medida autónomos sumergidos, su instalación se pospuso hasta el día 26 de octubre de 2018 por causas meteorológicas. Todos los equipos fueron retirados el 28 de noviembre de 2018, a excepción de las estaciones meteorológicas que continuaron operativas hasta el mes de abril de 2019 con tal de proporcionar series temporales largas para campañas posteriores. Su ubicación queda representada en la Figura 5 mediante dos puntos rojos (Exterior y Bocana).

Adicionalmente, los días 8 y 22 de noviembre se llevaron a cabo medidas puntuales de perfiles CTD (una sonda de conductividad, temperatura y profundidad) a lo largo de 27 puntos de medida distribuidos por toda la superficie de la bahía. A partir de estas mediciones se ha podido registrar información referente a la temperatura, la salinidad,

el oxígeno disuelto y la turbidez de toda la columna de agua. La Figura 7 ubica los puntos de medida mediante una fotografía aérea de la bahía.



*Figura 7 Ubicación de los diferentes puntos de medida de los CTD los días 8 y 22 de noviembre.*

Puesto que los valores recogidos por los CTD corresponden a dos días en el mes de noviembre, al inicio y al final del mes, este estudio se limitará al mes de noviembre. Es decir, la serie de datos analizada abarca el periodo 1/11/2018 – 28/11/2018.

#### 4.2. Características de instrumentos y estaciones

Una vez presentados los equipos de medida, a continuación, se detallan las características de cada uno de ellos, así como de todas las estaciones utilizadas durante la campaña.

En las estaciones meteorológicas y de nivel se han obtenido datos referentes al nivel del mar, la velocidad y dirección del viento. Además, en la estación de Batea también se ha registrado la temperatura y la presión atmosférica.

*Tabla 2 Instrumentos y características de la estación meteorológica de la Ampolla.*

<b>Localización</b>	<b>Puerto de la Ampolla</b>
<b>Altitud</b>	5.0 m
<b>Instrumentos</b>	Anemómetro acústico WindSonic Sensor de nivel del mar radar VEGA PULSE62
<b>Parámetro medido</b>	Velocidad y dirección del viento Nivel del mar

*Tabla 3 Instrumentos y características de la estación meteorológica de Batea.*

<b>Localización</b>	<b>Batea</b>
<b>Altitud</b>	3.5 m
<b>Instrumentos</b>	Anemómetro acústico WindSonic Sensor de nivel del mar radar VEGA PULSE62 Sonda de temperatura y humedad Vaisala HMP40 Sensor de presión atmosférica Vaisala PTB110
<b>Parámetro medido</b>	Velocidad y dirección del viento Nivel del mar Temperatura del aire Presión atmosférica

Para tratar de determinar la aportación de agua procedente del canal del Trastellador, se instaló un correntímetro en su desembocadura orientado de manera perpendicular a la sección. A partir de los valores medidos de velocidad puntual, presión de la columna de agua y la sección del canal en el punto de medida, ha sido posible calcular el caudal.

*Tabla 4 Instrumentos y características de la estación del Trastellador.*

<b>Localización</b>	<b>Puente del Trastellador</b>
<b>Periodo de fondeo</b>	16/10/2018 10:23 – - 28/11/2018 08:40
<b>Profundidad</b>	0.7 m
<b>Instrumentos</b>	Correntímetro acústico puntual Nortek Vector
<b>Parámetro medido</b>	Velocidad (X, Y, Z) Presión Temperatura del agua

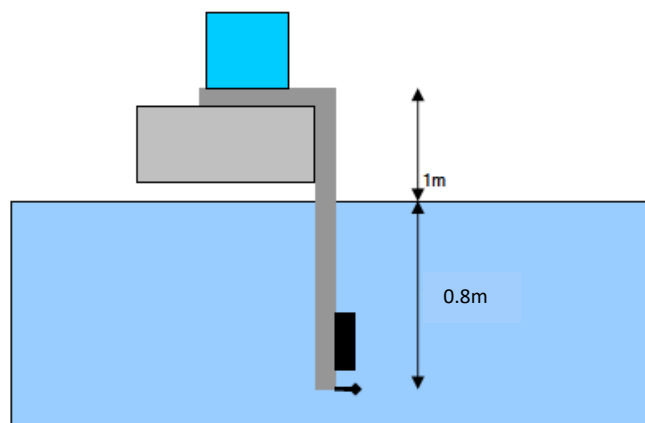


Figura 8 Esquema estación de medida del caudal del canal del Trastellador. Fuente: Informe Capanya Tardor (CIIRC).

En los equipos de medida sumergidos, se han registrado datos de velocidad y dirección de las corrientes cada 10 minutos en capas de 25 cm de grosor distribuidas desde el fondo hasta la superficie, así como registros de altura, periodo y dirección del oleaje. También se han realizado medidas de turbidez con los *Optical Backscatter Sensor* (OBS). El esquema de las instalaciones de fondeo utilizadas se recoge en la Figura 9.

Tabla 5 Instrumentos y características de los equipos sumergidos en la Bocana (Fangar).

<b>Localización</b>	<b>Bocana Bahía del Fangar</b>
<b>Periodo de fondeo</b>	26/10/2018 08:41- 28/11/2018 08:39 UTC
<b>Profundidad</b>	4.0 m
<b>Instrumentos</b>	Correntímetro Nortek Aquadopp 2MHz
	Sensor de turbidez óptico OBS3+
	Localizador Pinger Teledyne-Benthos ALP-365
<b>Parámetro medido</b>	Velocidad y dirección de corrientes
	Altura y dirección de oleaje
	Turbidez

Tabla 6 Instrumentos y características de los equipos sumergidos en el Golfo de la Ampolla.

<b>Localización</b>	<b>Golfo de la Ampolla</b>
<b>Periodo de fondeo</b>	26/10/2018 08:16 - 28/11/2018 08:06
<b>Profundidad</b>	7.0 m
<b>Instrumentos</b>	Perfilador Nortek Aquadopp 2MHz
	Sensor de turbidez óptico OBS3+
	Localizador Pinger Teledyne-Benthos ALP-365
<b>Parámetro medido</b>	Velocidad y dirección de corrientes
	Altura y dirección de oleaje
	Turbidez

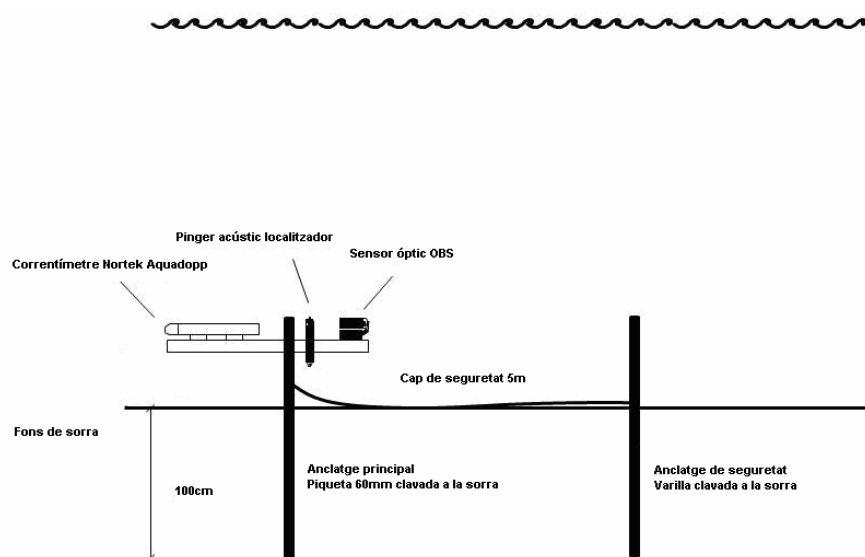


Figura 9 Esquema del sistema de fondeo utilizado tanto en la estación de la Bahía como en la de Bocana. Fuente: Informe Capanya Tardor (CIIRC).

Los perfiles CTD obtenidos los días 8 y 22 de noviembre, proporcionaron datos de toda la columna de agua en 27 puntos de la Bahía del Fangar y el Golfo de la Ampolla. Estas medidas han permitido obtener datos de conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y turbidez. En la Figura 10 se puede observar el aparato utilizado durante la campaña, el Sea-Bird Electronics (SBE 19 plus). La frecuencia de recogida de datos es de 4Hz.



Figura 10 Modelo de sonda CTD (SBE 19plus V2 SeaCAT Profiler CTD) utilizado durante la campaña de recogida de datos los días 8 y 22 de noviembre de 2018 en la bahía del Fangar. Fuente: [www.seabird.com](http://www.seabird.com).



#### 4.3. Procesado de los datos

Una vez descargados los datos de los sensores, con tal de que la información que contienen sea fácilmente aprovechable, los técnicos del LIM/UPC han llevado a cabo un primer procesado de los datos. Tras este primer filtro, se han realizado diferentes procedimientos para representar la información relativa a cada variable.

##### 4.3.1. Meteorología

A continuación, se explica el procesamiento de datos procedentes de las estaciones meteorológicas y de nivel ubicadas en el puerto de la Ampolla y en una batea en el interior de la bahía. Se hará referencia a la primera como “estación de Ampolla” y a la segunda como “estación en el interior de la bahía”.

Tal como se ha mencionado anteriormente, ambas estaciones se instalaron el 16 de octubre y han estado registrando datos en continuo hasta finales de abril. Sin embargo, con el fin de analizar un intervalo que analicen también el resto de los instrumentos de la campaña, solo se tienen en cuenta las fechas comprendidas entre el 1 y el 28 de noviembre.

Tanto la estación de la Ampolla como la de Batea, son totalmente autónomas, registrando los datos en una memoria interna a la vez que son enviados a una estación de seguimiento desde donde se controla. Ambas registran datos de velocidad y dirección del viento y nivel del mar promediados en intervalos de un minuto, diez minutos y una hora.

En la estación de la Ampolla, el viento se mide a 5 metros sobre la superficie del agua. Ya que el anemómetro está orientado a unos  $36.6^\circ$  respecto al norte, se rehace el cálculo de la dirección media del viento añadiendo estos  $36.6^\circ$ . En Batea, además de las variables ya mencionadas, también se registran datos de presión atmosférica y temperatura, promediados con los mismos intervalos. En este caso, el anemómetro se



encuentra a 3.5 metros sobre la superficie y está orientado con un azimuth de unos  $40^\circ$ , por tanto, se han corregido los datos de dirección media del viento sumándoles  $40^\circ$ .

Para este análisis se han utilizado los valores promediados a una hora. Por tanto, para el periodo establecido se han utilizado 659 datos de cada estación: 24 datos por día, durante 27 días (del 1 al 27 de noviembre) y 11 datos del día 28, momento en el que se procedió a la retirada de los equipos sumergidos.

Tanto para la variable temperatura como para el nivel del agua, se ha aplicado una media móvil diaria. En el caso de la temperatura, se han eliminado las oscilaciones diurnas; en el del nivel, el efecto de las mareas astronómicas.

#### 4.3.2. Caudales

##### Trastellador

Las medidas realizadas en el canal del Trastellador se han llevado a cabo mediante un correntímetro acústico doppler puntual situado bajo un puente de hormigón cercano a la desembocadura. El cálculo del caudal se ha basado en las medidas simultáneas de velocidad puntual y presión de la columna de agua. Estos datos, juntamente con las medidas de la sección del canal realizadas durante la retirada de la estación, permiten calcular los valores de caudal a lo largo de la serie.

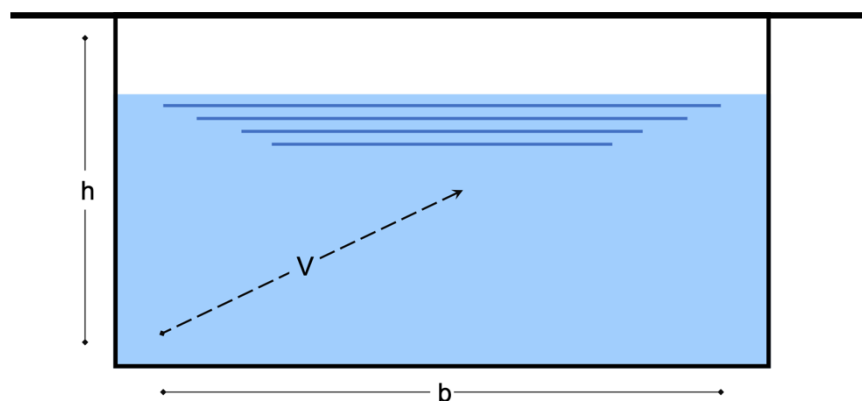


Figura 11 Esquema del Canal del Trastellador. Siendo:  $h$ , altura del canal;  $b$ , anchura del canal; y  $v$  velocidad de la corriente.

Los cálculos llevados a cabo para calcular el caudal a partir de la fórmula tradicional de han sido los siguientes:

$$Q = v * S \quad (1)$$

Dónde:

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s)

v= velocidad de la corriente (m/s)

S= sección del canal (m<sup>2</sup>)

Al tratarse de un canal de forma rectangular con irregularidades en el fondo, la fórmula para calcular su área ha sido la siguiente:

$$S = \text{sección } 0 + (b * (p - p_0)) \quad (2)$$

Dónde:

S= Sección del canal (m<sup>2</sup>)

Sección 0= Sección medida en un momento concreto (m<sup>2</sup>)

b= anchura del canal (m)

p= profundidad (m)

p<sub>0</sub>= profundidad en el momento concreto cuando se midió la sección 0 (m)

Conociendo los datos adjuntos en la tabla 7, y una vez llevado a cabo las operaciones anteriores, es posible realizar una aproximación del caudal medio diario que se vierte a la Bahía del Fangar desde el canal del Trastellador.

*Tabla 7 Medidas realizadas en el Canal del Trastellador para un posterior cálculo del caudal. El concepto "sección 0" corresponde con la sección medida en un momento concreto; p<sub>0</sub> indica la profundidad en el momento de la medida.*

<b>Anchura</b>	11.74 m
<b>Sección 0</b>	11.0 m <sup>2</sup>
<b>p<sub>0</sub></b>	0.6583 m

#### Bassa d'Olles e Illa de Mar

Para el cálculo del caudal de agua aportado a la bahía desde las estaciones bombeo de Bassa d'Olles e Illa de Mar, se solicitó a los regantes que anotaran las horas de funcionamiento de los tornillos de Arquímedes una vez al día durante el mes de noviembre. Las anotaciones, que se realizaron a mano en un estadillo para cada estación individualmente, se encuentran anexas a este documento.

El hecho de recoger estos datos manualmente y no con equipos de medida automatizados, presenta la desventaja de poder cometer errores. Esto ocurre los primeros tres días en la estación de Bassa de les Olles, cuyos registros se han suprimido. Por otro lado, los días en los que no hay datos, se supone que los tornillos no han estado en funcionamiento.

Ambas estaciones están formadas por cuatro tornillos con capacidad del bombear un caudal de 1.6 m<sup>3</sup>/s cada uno, pero puede variar. Asumiendo que se bombea un caudal constante de 1,6m<sup>3</sup>/s y conociendo las horas que ha estado funcionado diariamente, se ha realizado el siguiente cálculo:

$$Q = \frac{n^{\circ} \text{ horas} \times 1.6 \text{ m}^3/\text{s}}{24h} \quad (3)$$

Dónde:

Q= caudal diario.

Nº horas= suma del número de horas diarias en funcionamiento para todos los tornillos.

Por ejemplo, si han estado funcionando 16 horas:

$$Q = \frac{16h \times 1.6 \text{ m}^3/\text{s}}{24h} = 1.07 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Una vez realizados estos cálculos, ha sido posible presentar una aproximación del caudal medio diario aportado a la Bahía del Fangar desde Bassa de les Olles e Illa de Mar.

#### 4.3.3. Corrientes

En cuanto a los datos referentes a las corrientes, tal como se ha mencionado anteriormente, las mediciones se organizan en celdas o capas de 25cm desde el fondo hasta la superficie. En el caso de la estación de Bocana, se distinguen 24 celdas; en el de la estación del Golfo de la Ampolla 28, ya que esta zona presenta una profundidad mayor.

La estación de Bocana, cada 600 segundos realizaba el promedio y emitía un dato, es decir, se generaba un dato cada 10 minutos. Por tanto, para el periodo establecido se han utilizado 3961 datos para cada una de las 24 “capas”. En la estación del Golfo de la Ampolla, el promedio se realizaba cada 700 segundos, es decir, se generaba un dato cada 11,7 minutos. En este caso, para el análisis se han utilizado 3395 datos para cada una de las 28 “capas”. Por tanto, con tal de poder comparar las series de datos de ambas estaciones, se ha llevado a cabo un remuestreo diezminutal y se han interpolado los valores recogidos por la estación del Golfo de la Ampolla. De esta manera, los datos utilizados para comparar las variables de ambas estaciones han tenido el mismo intervalo (10 minutos).

Los registros de velocidad de ambas estaciones fueron tomados en la componente N-S y E-W para toda la columna de agua. Cuando las corrientes se daban en la dirección Norte o Este, los datos tomaban valores positivos; por el contrario, cuando la dirección era Oeste o Sur, los valores eran negativos. A partir de cada pareja de datos ha sido posible calcular el módulo de velocidad de la corriente. Ya que los datos originales estaban registrados en metros/segundo y las velocidades no eran excesivamente altas, se han convertido a cm/s.

$$M = \sqrt{U^2 + V^2} * 100 = (\text{cm/s}) \quad (5)$$

Dónde:

M= módulo de velocidad de la corriente.

U= componente Este-Oeste de la velocidad.

V= componente Norte-Sur de la velocidad.

Para conocer la dirección resultante de ambas componentes, ha sido necesario hacer un cálculo. Este cálculo depende del signo de dichas componentes (U y V), que indica el cuadrante en el que se encuentra la velocidad. Para una mejor comprensión se presenta el siguiente esquema:

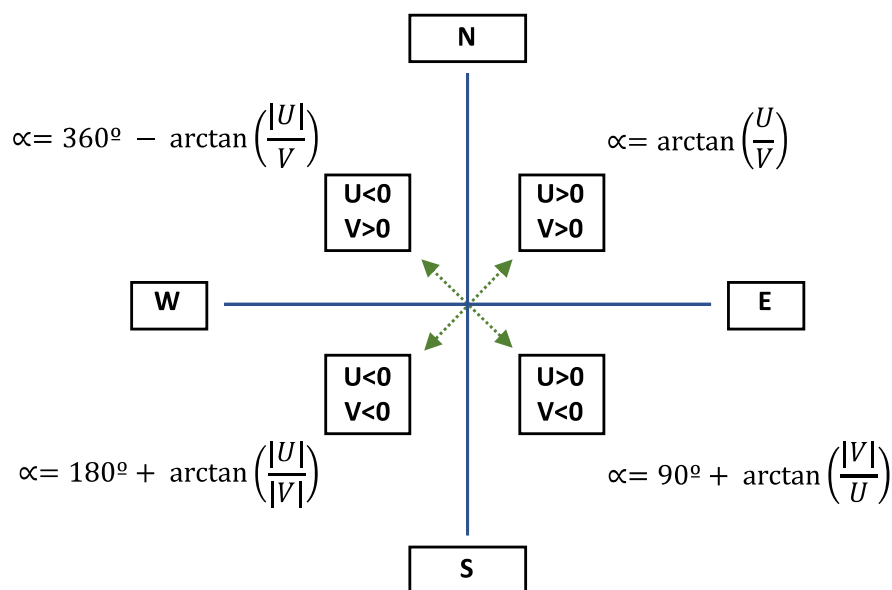


Figura 12 Cálculos para la dirección de las corrientes.

Hay que tener en cuenta que la dirección de una corriente, al contrario que la del viento, hace referencia a aquella dirección hacia donde se dirige, no de donde viene. Además, se ha mantenido el Norte como referencia, aumentando los ° en el sentido de las agujas del reloj.

#### 4.3.4. Turbidez

Los datos referentes a la turbidez, tal como se ha mencionado anteriormente, han sido registrados mediante dos sensores de turbidez OBS, uno ubicado en la estación de la Bocana y otro en la del Golfo de la Ampolla. Dichos sensores, no proporcionan

directamente datos de turbidez, por lo que es necesario llevar a cabo una serie de operaciones para cambiar las unidades.

En primer lugar, es necesario convertir los datos originales proporcionados por el aparato a unidades de voltaje. La expresión utilizada es la que corresponde a la calibración de los sensores.

$$V_1[mV] = \text{datos} * \frac{5000}{65535} \quad (6)$$

Una vez obtenidos los datos de voltaje, deben convertirse a Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), que corresponde con una concentración del producto usado como patrón, la Formacina. Es una solución que se crea a partir de Sulfato de Hidracina y Hexamitelentraamina para formar el patrón de turbidez de 400 NTU.

Las ecuaciones (7) y (8) son las descritas por el fabricante del instrumento para llevar a cabo dicha conversión, cuyos coeficientes dependen de la calibración de los mismos. La primera corresponde al sensor localizado en la bocana de la bahía, la segunda a la ubicada en el Golfo de la Ampolla.

$$NTU = -0.2854359 + 0.1802474 * V_1 + 2.16 * 10^{-5} * v_1^2 \quad (7)$$

$$NTU = -0.1580691 + 0.1717459 * V_1 + 2.37 * 10^{-5} * v_1^2 \quad (8)$$

Tras realizar los cálculos anteriores se han representado gráficamente los resultados del análisis de turbidez.

#### 4.3.5. Nivel del mar y seiches

Para tratar de caracterizar de forma más completa la hidrodinámica de la bahía del Fangar, se ha creído conveniente examinar las variaciones del nivel del mar y estudiar la posibilidad de la existencia de episodios de seiches intensas.

En las estaciones meteorológicas y de nivel de Ampolla y Batea, los registros de nivel del mar se han obtenido directamente del sensor de nivel, es decir, no se ha llevado a cabo ningún cálculo o conversión tras el volcado de datos.

En el caso de las estaciones fondeadas en Exterior y en Bocana, éstas han registrado las variaciones de presión de la columna de agua en el fondo, por lo que ha sido necesario realizar una serie de cálculos para obtener las variaciones de nivel del mar.

En primer lugar, a la presión en el fondo que ha sido registrada, se le ha restado la presión media, de esta forma se obtienen únicamente los aumentos o las disminuciones de nivel con respecto al nivel medio del periodo.

En segundo lugar, con tal de poder comparar los valores obtenidos de nivel del agua en Bocana y Exterior con los registrados en Ampolla y Batea, a los resultados se les ha sumado las variaciones de la presión atmosférica registradas en Batea sobre la presión media (1013 hPa), es decir, la presión hidrostática. Por lo tanto, asumiendo que 1 milibar (mb) equivale a 1cm de variación de presión de agua, se han obtenidos los resultados finales que se presentan en el capítulo 5.1.6 *Nivel del mar*.

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos necesarios para determinar la existencia o no de seiches durante el periodo de estudio, se ha utilizado el módulo *ttide* de Python, que extrae mediante un análisis de armónicos la componente de marea astronómica y proporciona tres resultados: la componente de nivel del mar original, la componente correspondiente a la marea astronómica y el residuo (en nuestro caso las seiches), que es la resta de las dos primeras componentes.

#### 4.3.6. Perfiles de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y turbidez

Los días 8 y 22 de noviembre se llevaron a cabo las campañas CTD en la Bahía del Fangar y el Golfo de la Ampolla. Se registraron medidas de temperatura, salinidad, densidad

oxígeno disuelto y turbidez en toda la columna de agua de 27 puntos extendidos por toda el área de estudio. En la figura 6 se presenta la situación de los diferentes puntos de medida utilizados ambos días.

El análisis de las variables mencionadas se ha llevado a cabo mediante el software “Ocean Data View” (ODV). Es una herramienta para el análisis y la visualización de datos oceánicos y meteorológicos referenciados geográficamente y a lo largo de secuencias temporales. Es un instrumento útil para trabajar con grandes conjuntos de datos ya que permite representarlos en formas muy diversas, tanto individualmente para cada estación como para el conjunto de todas las estaciones o una sección personal definida.

Las unidades utilizadas para cada variable registrada han sido las siguientes:

- Temperatura, grados Celsius, °C.
- Salinidad, Practical Salinity Unit (PSU), expresa gramos de sal por litro de solución.
- Densidad,  $\sigma_t$  ( $kg/m^3$ ).
- Oxígeno disuelto,  $mg/l$ .
- Turbidez, unidades de turbidez de formacina (FTU).

ODV permite elaborar una serie de gráficos predefinidos para ilustrar los datos de diferentes formas según los intereses del usuario: gráficos de perfiles, diagramas de dispersión, secciones verticales y secciones horizontales.

En este caso, se han llevado a cabo cuatro secciones verticales del área de estudio (Figura 13). Estas secciones se han determinado de tal manera que quede representada la totalidad del estuario. Es decir, se ha escogido una sección en el Golfo de la Ampolla, otra en la bocana, otra en el interior de la bahía y una última transversal desde la zona interior hasta la parte más exterior. Se procede a presentar los resultados en el capítulo *5.2 Perfiles verticales*.



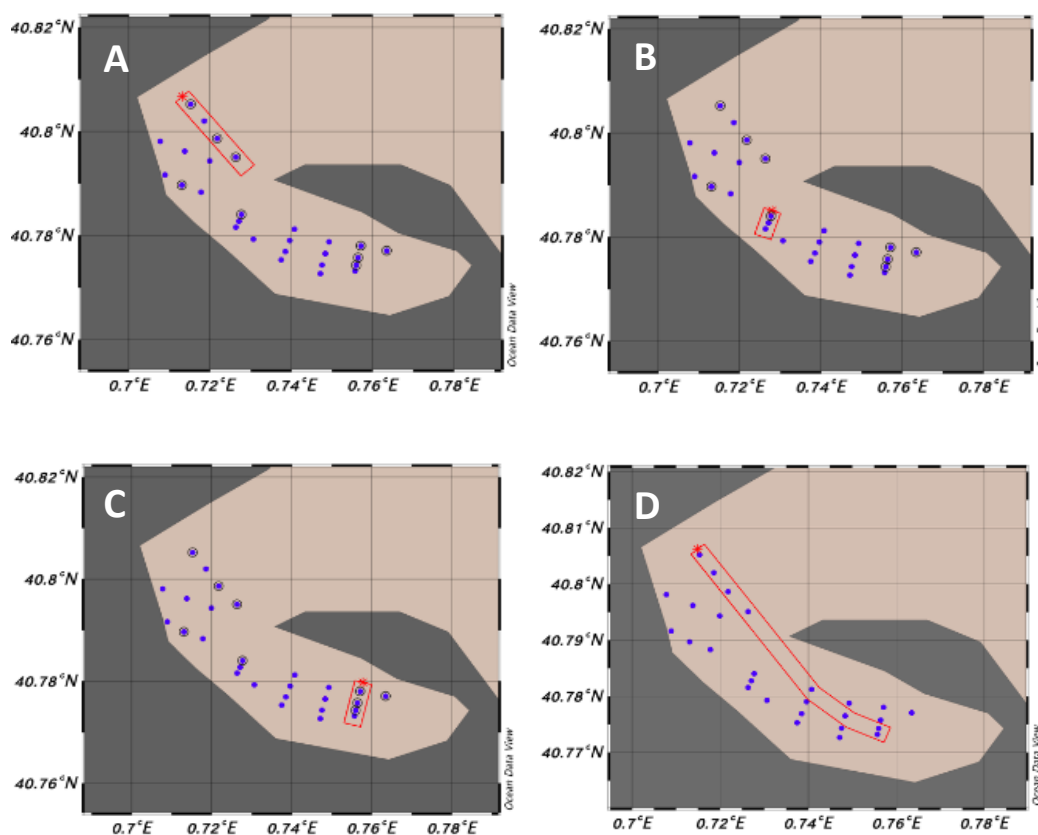


Figura 13 Secciones seleccionadas en el ODV para el análisis de los correspondientes parámetros registrados por el CTD. A, sección en el exterior; B, sección en la bocana; C, sección en el interior; D, sección transversal a lo largo de la bahía.

## 5. Resultados

### 5.1. Análisis de las series temporales

Para la consecución de los objetivos de este trabajo, es necesario estudiar y relacionar las variables que se presentan a lo largo de este capítulo. A continuación, se analizan las series de datos temporales para cada una de las estaciones: Ampolla y Batea en el caso de las estaciones meteorológicas; Bassa de les Olles, Illa de Mar y Trastellador, en el caso de las medidas referentes a los caudales; y Bocana y Exterior en el caso de los equipos sumergidos.

#### 5.1.1. Meteorología

Con tal de entender el comportamiento hidrodinámico de la bahía del Fangar hay que considerar ciertas variables meteorológicas como el viento y temperatura del aire. A

continuación, se presentan los resultados recogidos por las estaciones meteorológicas ubicadas en Batea y en el puerto de la Ampolla.

#### Viento: velocidad y dirección

En la Figura 14, se presenta la evolución temporal de la velocidad media del viento a lo largo del mes de noviembre (1-11/28-11). Tal como se puede observar, destacan dos episodios de viento intensos durante los días 17 y 27 de noviembre.

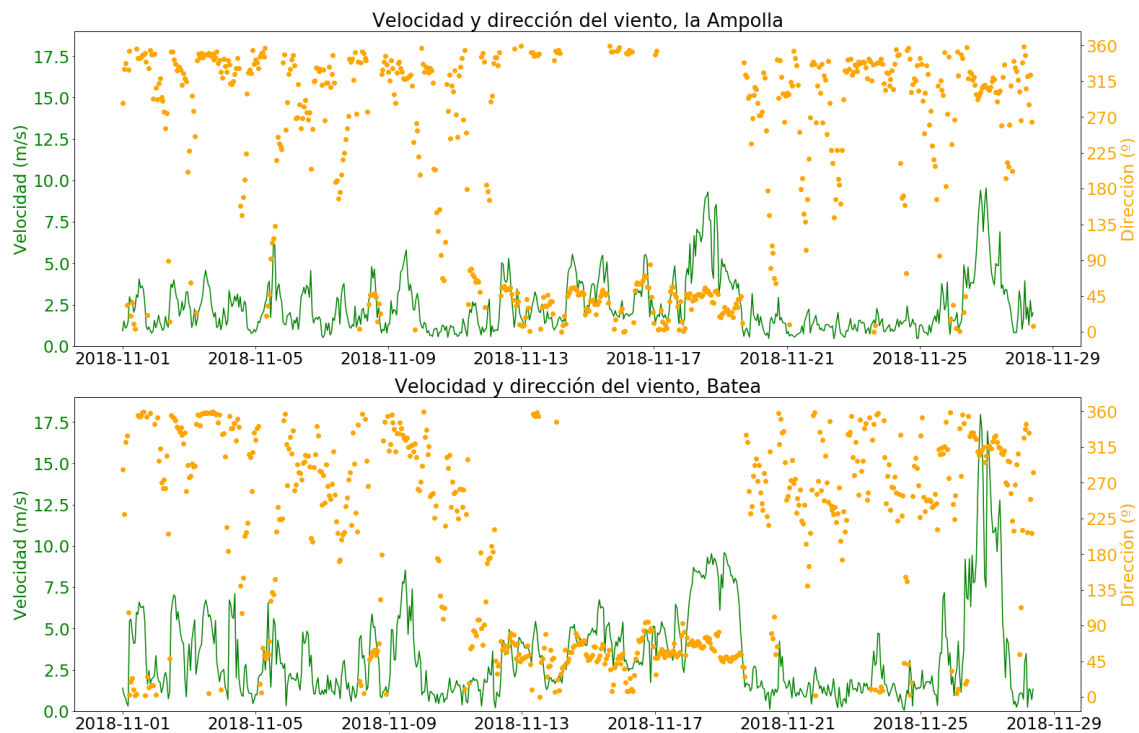


Figura 14 Velocidad y dirección del viento registrados en la estación del puerto de la Ampolla (imagen superior) y en la Batea (imagen inferior).

El primer episodio corresponde a vientos del NE ( $0-45^\circ$ ) y se desarrolló entre los días 11 y 19. Concretamente, hay dos picos de viento intenso los días 18 y 19, llegando a velocidades de 10m/s en la Ampolla. En Batea, este primer episodio de vientos del NE coincide tanto en duración como en intensidad. Sin embargo, durante el segundo evento de viento fuerte, entre los días 26 y 27, la estación en Batea presenta intensidades mucho más altas en relación con la Ampolla. En esta ocasión, se trata de un viento del NW ( $315^\circ$ ), muy afectado por la orografía local.

El episodio de viento de los días 26 y 27 fue consecuencia del paso de un frente atlántico que, juntamente con el anticiclón del atlántico desplazado al norte, generó un flujo de viento muy marcado en los dos extremos de Cataluña y en los Pirineos. [14]

En las rosas de los vientos (Figura 15) queda reflejada la información explicada anteriormente: los vientos predominantes durante la campaña y los más intensos corresponden a vientos del NW y NE.

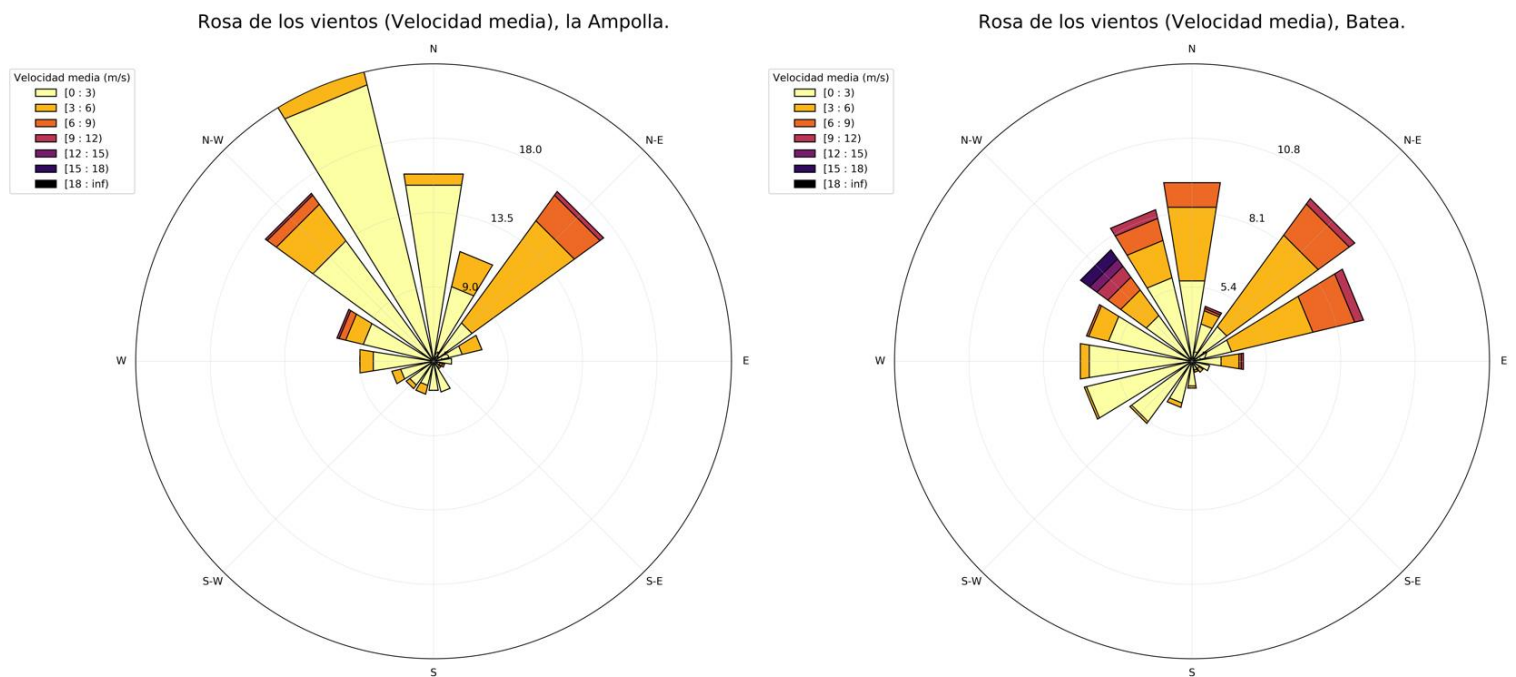
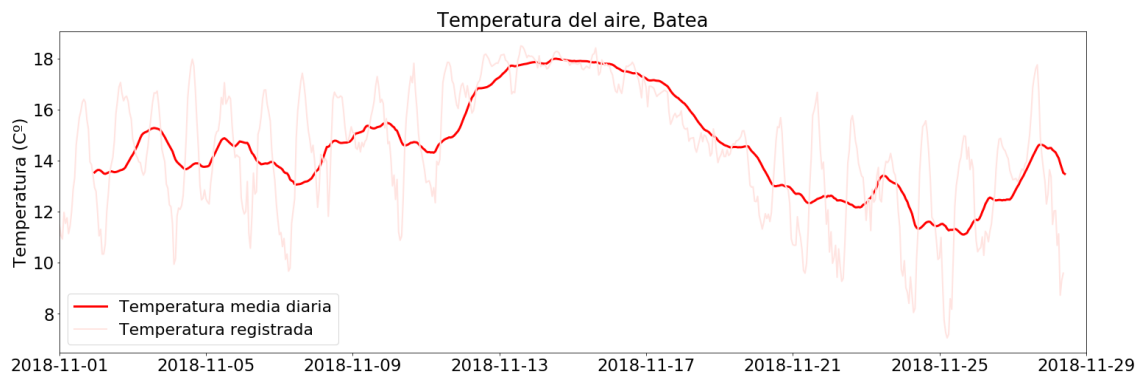


Figura 15 Rosa de los vientos en la estación de Ampolla (izquierda) y Batea (derecha) del mes de noviembre de 2018.

## Temperatura

En la estación meteorológica y de nivel de Batea, se ha registrado la evolución de la temperatura del aire. La Figura 16 muestra su evolución temporal a lo largo del periodo de estudio.



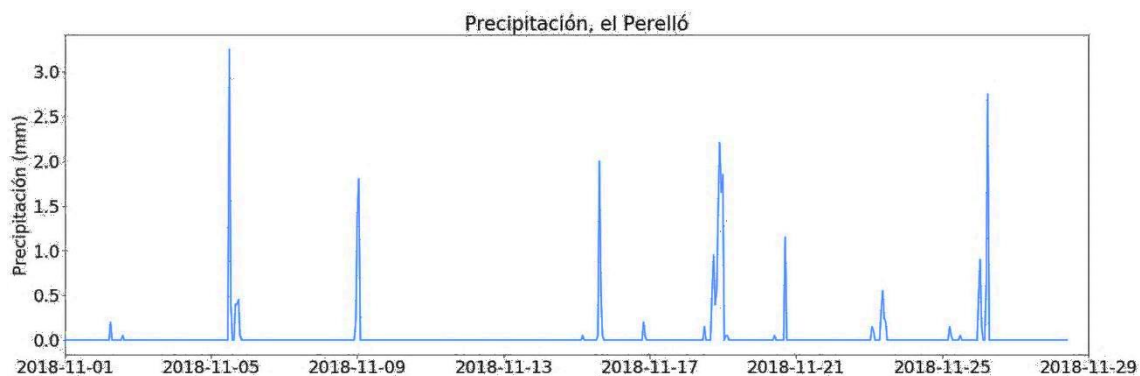
*Figura 16 Temperatura del aire registrada en la estación de Batea.*

En color rosa se observan las oscilaciones térmicas diarias correspondientes con el ciclo día-noche. Esta amplitud térmica alcanza a los 8°C, lo que encaja con las características del clima de la región y la época del año. Analizando la serie temporal completa, se aprecia una subida generalizada de temperaturas de unos 2°C entre los días 11 y 16, fechas que coinciden con el episodio de viento de Levante, más templados y cálidos en esa época del año. A partir del día 17, la temperatura disminuye hasta los 12°C aproximadamente.

### Precipitación

Al no disponer de registros pluviométricos de ninguna de las dos estaciones meteorológicas, se han utilizado los datos de la estación del Perelló extraídos de la web del Meteocat. En este caso de estudio, la importancia de los registros de precipitación reside en la influencia que puede tener en el caudal de agua que se vierte a la bahía del Fangar desde tierra.

En la Figura 17 se presenta la pluviometría registrada. Se distinguen cuatro periodos de precipitaciones importantes: los días 5-6, 8-9, 17-19 y 23-26. Una vez calculada la aproximación de los caudales de agua que se han vertido a la bahía durante el mes de la campaña, es interesante comparar las fechas de los picos de precipitación con los picos de los caudales vertidos. Esta comparativa se lleva a cabo en el capítulo 5.1.2 *Caudales*.



*Figura 17 Pluviometría registrada en la estación del Perelló.*

Hay que tener en cuenta la larga trayectoria del río Ebro y la variabilidad espacial que pueden tener las precipitaciones según la orografía de la zona. Es posible que en la propia bahía no haya precipitaciones en un momento concreto, pero sí se estén dando unos kilómetros río arriba o en la extensa superficie del delta. Esto implica, que parte de esta agua puede terminar llegando a las bahías. Por ello, antes de proceder a examinar los caudales que llegan a la bahía, es conveniente analizar de manera más global las precipitaciones de la región. En la Figura 18, se observa la precipitación acumulada (mm) en toda Cataluña durante los días de más precipitación en el Perelló, ya mencionados anteriormente.

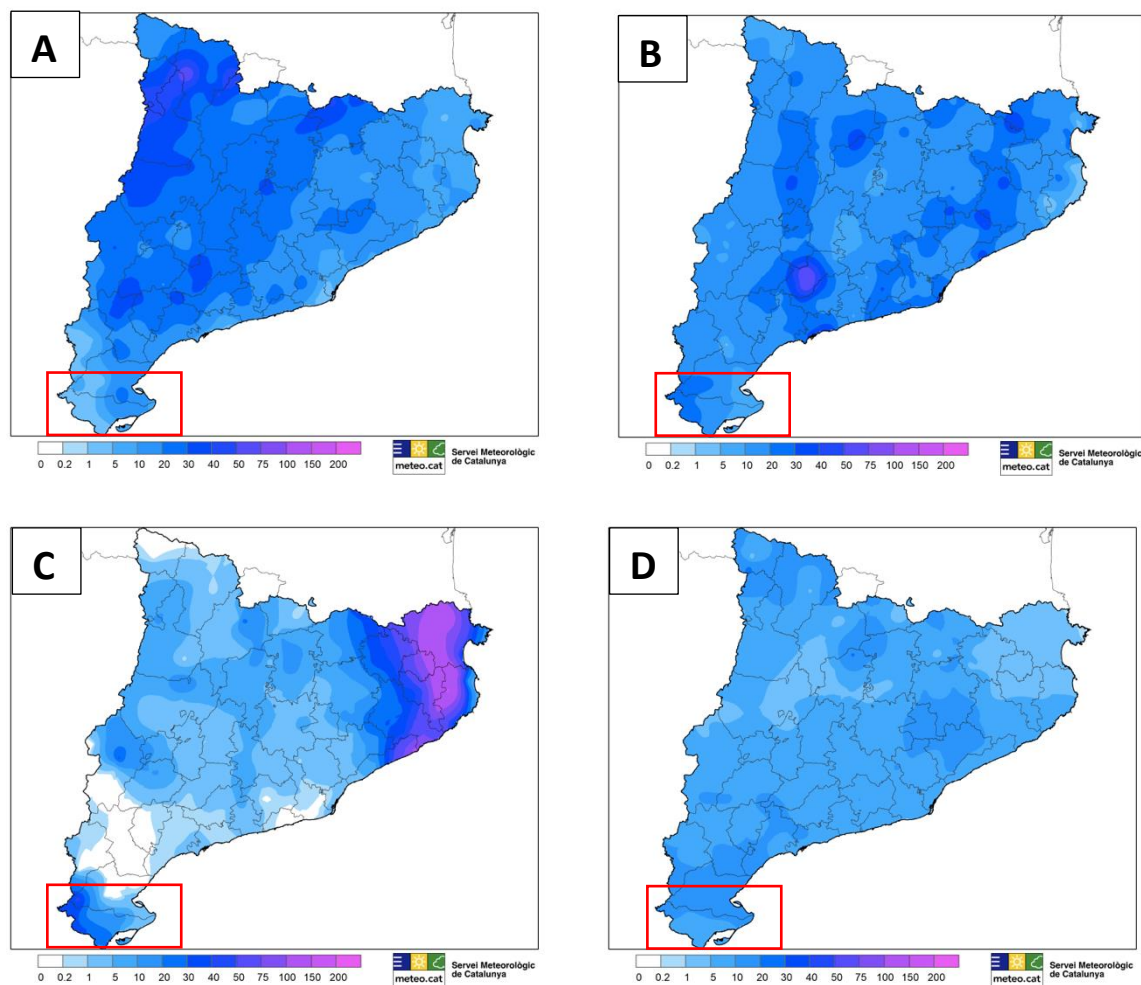


Figura 18 Mapas de precipitación acumulada (mm) en Cataluña. A, días 5-6; B, días 8-9; C, días 17-19; D, días 23-26; Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya.

Tal como se puede observar en la Figura 18, se han producido precipitaciones en las regiones cercanas a la zona de estudio, comarcas Baix Ebre y Montsià. La siguiente tabla resume la precipitación máxima acumulada (mm) para los días citados anteriormente:

Tabla 8 Precipitación acumulada (mm) en Baix Ebre y Montsià.

DÍA	PRECIPITACIÓN (MM)
5-6	0.2 – 20
8-9	5 – 30
17-19	0 – 40
23-26	5 – 20

### 5.1.2. Caudales

Durante la campaña, con tal de realizar una aproximación de los caudales de entrada de agua dulce a la bahía, se han seguido dos líneas de trabajo.

Por un lado, se han instalado sistemas de medida (correntímetro y sensor de nivel) en el Trastellador. Tal como se ha explicado en el apartado 4.3.2 *Caudales/Trastellador*, a partir de los datos registrados y conociendo la sección, se ha determinado el caudal que sale a través del canal. Ya que los sistemas de medida proporcionaban un dato medio cada 10 minutos, se ha aplicado una media móvil diaria para poder comparar estos datos con los resultados diarios obtenidos en las estaciones de bombeo. En esta estación, también se ha registrado la temperatura del agua.

Por otro lado, gracias al acuerdo con los Regantes, se han obtenido los datos correspondientes a las horas de funcionamiento de las bombas de agua que vierten agua dulce a la bahía del Fangar desde las estaciones Bassa de les Olles e Illa de Mar. El procedimiento para calcular los caudales a partir de las horas de funcionamiento ha sido explicado en el apartado 4.3.2 *Caudales/Bassa de les Olles e Illa de Mar*.

Los resultados de ambos procedimientos se presentan en la Figura 19. Tal como se puede observar, a lo largo del mes de noviembre destacan cuatro momentos en los que el caudal de desagüe procedente de las estaciones se incrementa notablemente: los días 6, 20-21, 23 y 27.

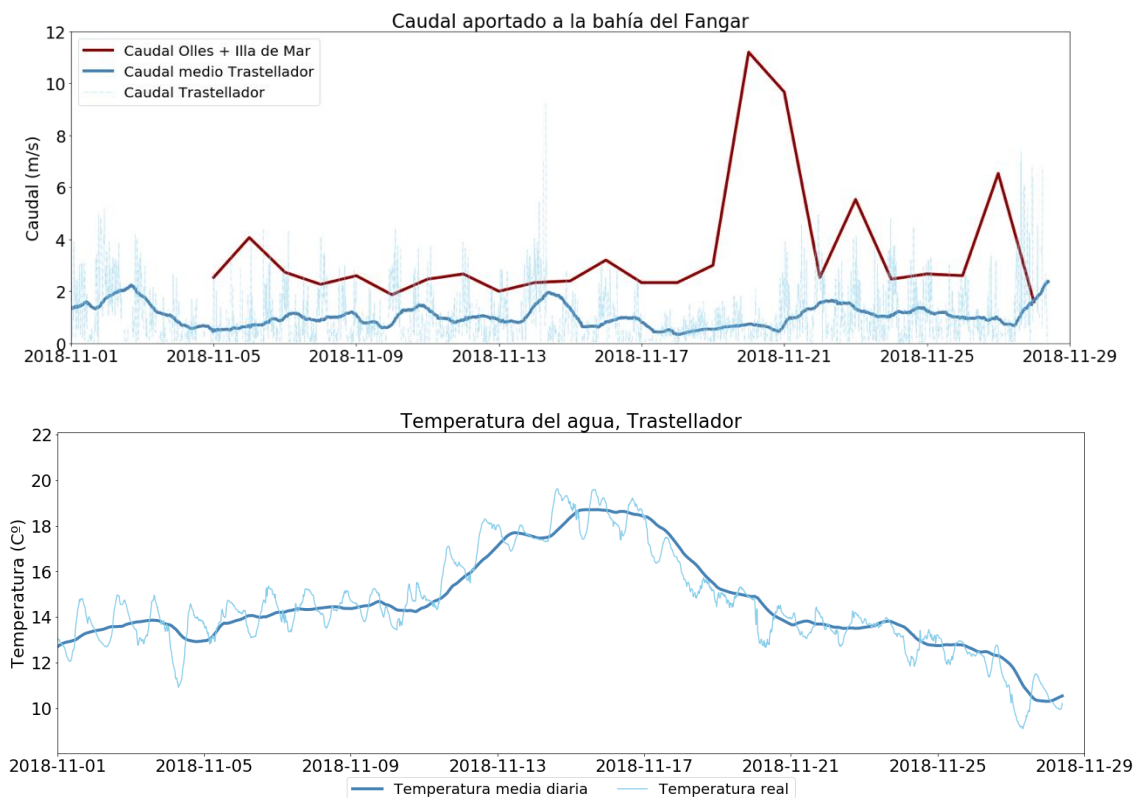


Figura 19 Caudal aportado a la bahía del Fangar y temperatura del agua (°C) del canal del Trastellador durante el periodo de estudio.

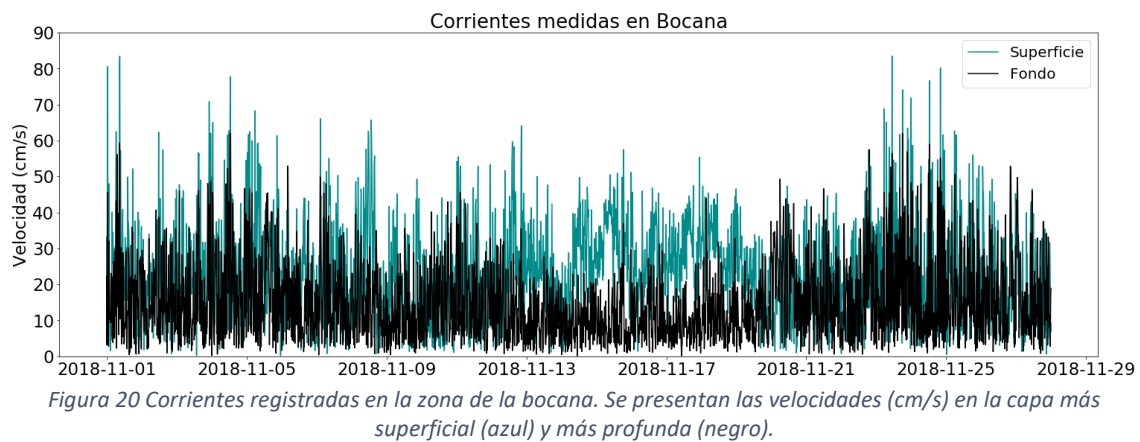
### 5.1.3. Corrientes

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las estaciones fondeadas en la bocana de la bahía y en el Golfo de la Ampolla en relación con las corrientes. En primer lugar, se examina la velocidad en superficie y en profundidad, seguido de un análisis de las direcciones. Es preciso recordar que se ha trabajado con celdas de 25 cm en la columna de agua en ambos casos, distinguiendo 16 capas en el caso de la bocana y 28 en el caso de la zona exterior, ya que presentan profundidades diferentes.

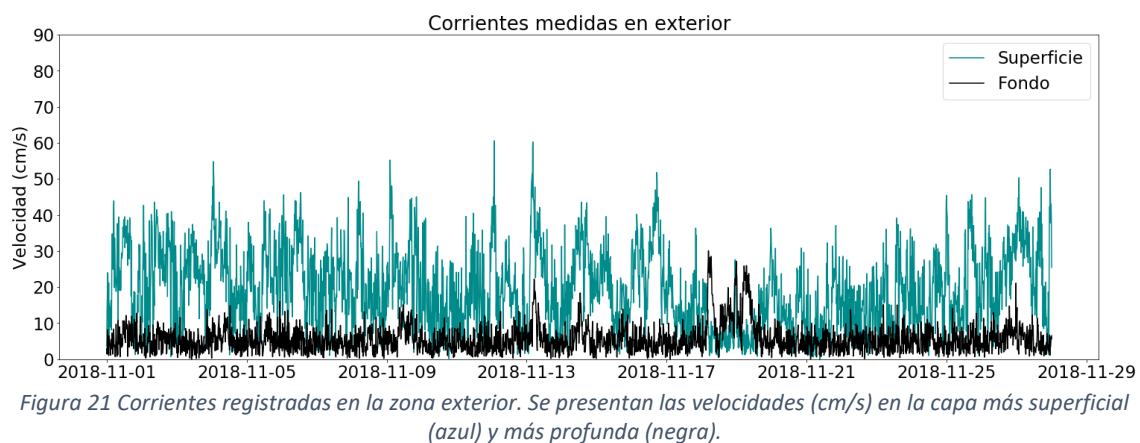
Se han eliminado del análisis las capas más alejadas de los sensores, es decir, las que pueden quedar en ocasiones fuera del agua o están en el límite entre el agua y aire. En el caso de las medidas registradas en la bocana, se han desestimado las 3 últimas capas (las más superficiales); en Exterior, se han suprimido las 4 últimas.



Tal como se observa en la Figura 20, a pesar de la escasa profundidad en este punto (entorno a los 4 metros), la velocidad de las corrientes en la bocana presenta una variabilidad importante. Tal como es habitual, la velocidad en superficie es superior a la del fondo, superando intensidades de 80 cm/s y con oscilaciones de unos 40 cm/s. En el fondo, generalmente varía entre los 10-30 cm/s.



En la zona más exterior, en el Golfo de la Ampolla, al tener una profundidad mayor (unos 7 metros), las diferencias entre la capa profunda y la superficial son más notables. En la Figura 21, se puede observar que las velocidades en el fondo se sitúan entorno a los 10 cm/s y en superficie entre los 30-50 cm/s.



Es importante destacar el fenómeno ocurrido entre el 19 y el 20 de noviembre, cuando las velocidades en superficie descienden considerablemente en ambos puntos y aumentan en la capa más profunda hasta incluso superar a las velocidades en superficie.

Tal como se ha podido observar, la zona de la bocana presenta velocidades más altas que la zona exterior. Estas corrientes más intensas, podrían relacionarse con fenómenos oscilatorios de tipo marea o seiches, que se analizarán más adelante en el capítulo marea astronómica y meteorológica.

La Figura 22, presenta las rosas de corrientes para la estación en la bocana y en el golfo de la Ampolla (Exterior). En el caso de la estación de Bocana, se pueden observar dos direcciones más marcadas (NW-SE), así como intensidades más elevadas. En el caso de Exterior, la dirección predominante de las corrientes es S-SE. Sin embargo, al ser una zona más expuesta, se aprecian, aunque menos intensas, diferentes direcciones.

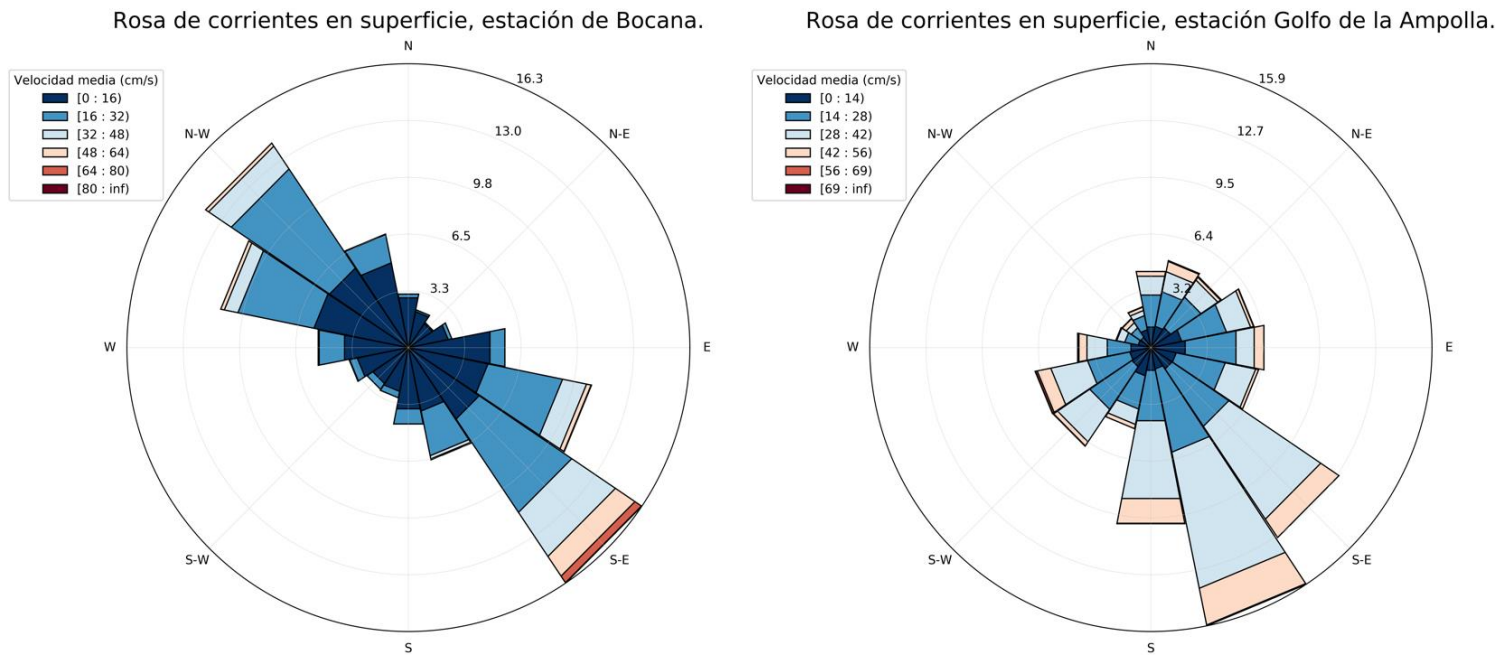


Figura 22 Rosa de corrientes en superficie de la estación de Bocana (izquierda) y Exterior (derecha) durante el mes de noviembre de 2018

En el caso de las medidas registradas en la estación de Bocana, el eje se ha rotado en la dirección predominante (NW), de esta forma los gráficos que se presentan a continuación indican las velocidades de las corrientes alongshore y crossshore.

En la Figura 23 se puede apreciar de manera más clara la canalización de las corrientes en la bocana. Tanto en el fondo como en superficie, las velocidades están más concentradas en una dirección. En cambio, en la zona exterior, a pesar de que las velocidades presentan oscilaciones más bajas, las direcciones no están tan definidas como en el caso de la bocana.

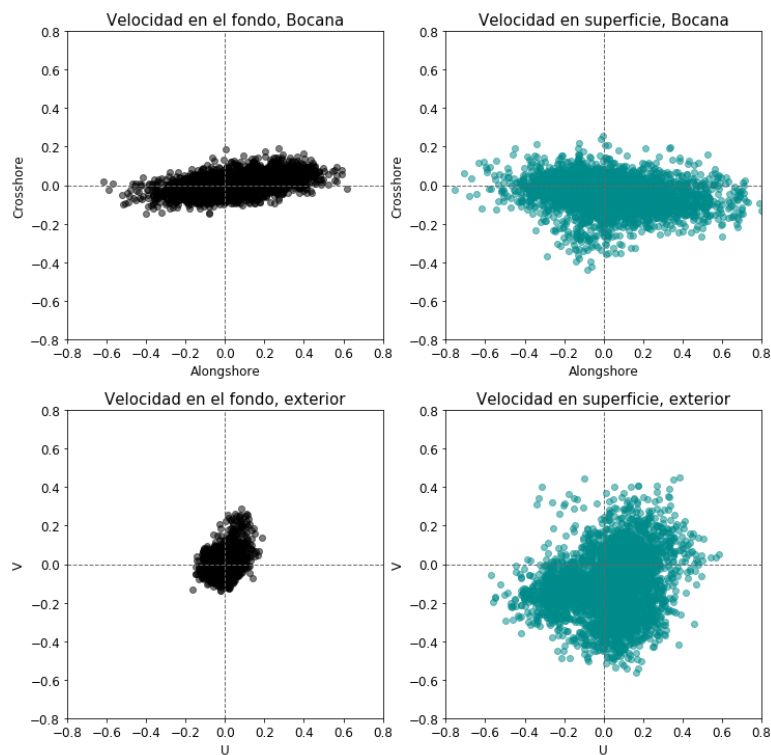


Figura 23 Corrientes observadas en la bocana y en el exterior, en superficie (azul) y en el fondo (negro).

Otra forma de analizar la evolución de la dirección y la intensidad de las corrientes en toda la columna de agua es mediante gráficos Hovmöller, que muestran en el eje X el tiempo y en el eje Y la profundidad. Estos diagramas presentan las velocidades en la columna de agua en dos componentes. En el caso de la Bocana: alongshore, con valores positivos indicando corrientes hacia el interior de la bahía; y crossshore. En el caso de Exterior, la componente U en el eje este-oeste, con valores positivos indicando corrientes hacia el este; y la componente V norte-sur, indicando la dirección norte con valores positivos.

La Figura 24 muestra cuatro gráficos de Hovmöller: dos en relación con las corrientes en Bocana (alongshore y crosshore) y dos con Exterior (norte y este). De manera global, se aprecian flujos más energéticos en Bocana (imágenes A y B) que en exterior (C y D), siendo en ambos casos más intensas en la superficie. Una de las principales diferencias es que en la zona de la bocana se observan velocidades similares en toda la columna de agua; sin embargo, en la zona exterior, se aprecian por lo general velocidades bajas y algunos flujos puntuales más intensos.

Otro hecho a destacar es la no homogeneidad de las corrientes en la columna de agua sobretodo en la zona de bocana. A unos dos metros desde el fondo, se puede apreciar como las corrientes se mueven en sentido contrario que en superficie. Durante los primeros metros de la columna de agua, esta circula hacia fuera de la bahía y por debajo penetra hacia dentro de la bahía. Esta dinámica permite la renovación de agua del estuario y se denomina circulación estuárica positiva.

Tanto en Bocana como en Exterior, durante los días 18-19 de noviembre, en las capas más profundas se observa una inversión en las direcciones además de un aumento de la velocidad (unos 25cm/s en Exterior y 50cm/s en Bocana). Éste y otros fenómenos de alta intensidad en periodos cortos de tiempo implican la necesidad de llevar a cabo un análisis más específico para determinar el proceso físico causante de estas energías en el interior de la bahía. En el apartado 5.1.7 *Marea astronómica y marea meteorológica* se estudia la posible presencia de este tipo de oscilaciones del nivel del mar.

Análisis experimental de la hidrodinámica y calidad de las aguas en la Bahía del Fangar

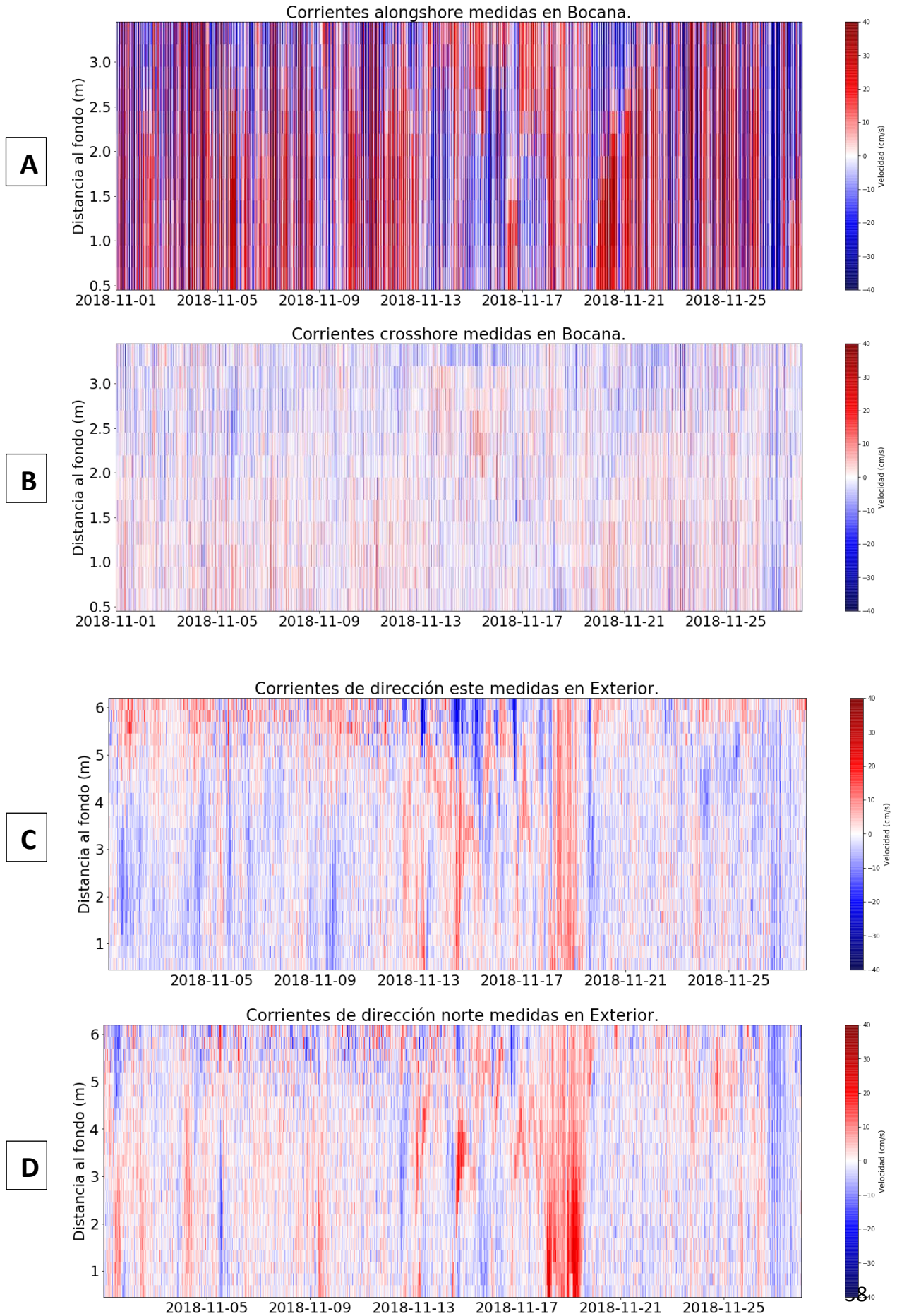


Figura 24 Diagramas de Hovmöller de las corrientes registradas en Bocana (A y B) y en Exterior (C y D). El eje Y presenta los metros desde el fondo, siendo la superficie 4 y 7 metros respectivamente.

#### 5.1.4. Oleaje y turbidez

Otras variables registradas por los instrumentos de fondeo son el oleaje y la turbidez. Se ha creído conveniente analizarlas conjuntamente por la posible relación causa-efecto entre ellas. Es decir, cabe esperar que los picos de turbidez coincidan con los picos de oleaje intenso.

En cuanto al oleaje, en una campaña previa (2017) se registraron en el interior de la bahía valores destacables de altura de ola durante un episodio de Mestral, alcanzando valores máximos de 40 cm [15]. Con tal de caracterizar de forma más adecuada el oleaje en la entrada de la bahía y su capacidad de afectar a la zona más interior, en esta campaña se ha ubicado uno de los sensores en la parte exterior de la bahía.

Tal como se puede observar en la Figura 25, los valores de dirección y periodo pico no muestran valores muy significativos. Sin embargo, datos referentes a la altura de ola significativa, sí presentan información que se puede relacionar con los parámetros ya analizados anteriormente. Por ello, el análisis se va a centrar en estos últimos datos.

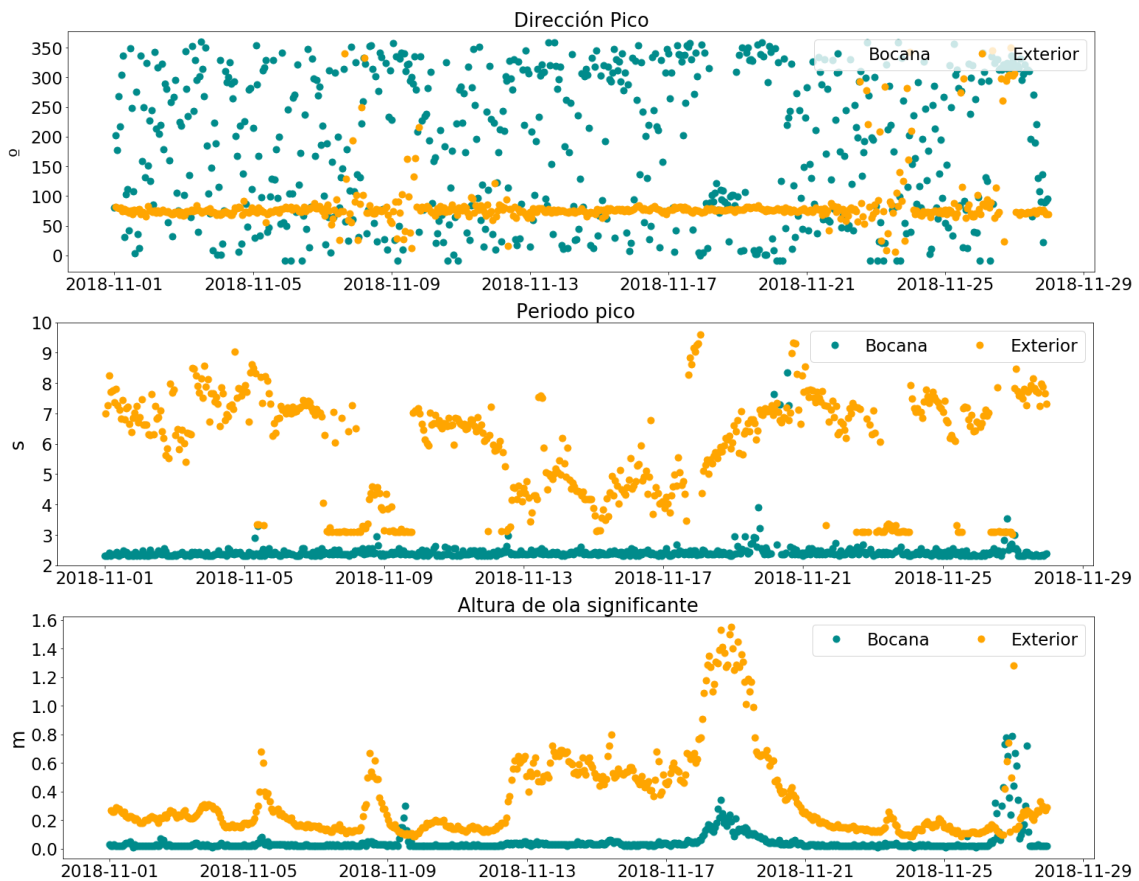


Figura 25 Oleaje registrado en las estaciones de Bocana (azul) y Exterior (naranja). En primer lugar, se muestra la dirección de pico, en segundo el periodo pico y en tercero la altura significativa.

En la zona exterior aparecen diferentes eventos energéticos con alturas de ola significativa<sup>1</sup> entorno a los 0.5m. Destacan los días 11-19 de noviembre al presentar alturas de hasta 1.6 metros. En Bocana, únicamente los días 18 y 19 se observan cambios significativos al llegar a alturas de 0.3m.

Sin embargo, durante los días 26-28, el oleaje de la zona de bocana es igual o incluso mayor que el registrado en el exterior.

Una vez identificados los momentos en los que destaca el oleaje, es interesante compararlos con la turbidez con tal de ver si se trata de turbidez producida por la resuspensión generada por el oleaje. En la Figura 26 se presenta la evolución temporal

<sup>1</sup> Altura significativa de ola: media aritmética del tercio de las olas más altas registradas.

de la turbidez en las estaciones de Bocana y Exterior juntamente con la altura de ola significativa ya analizada.

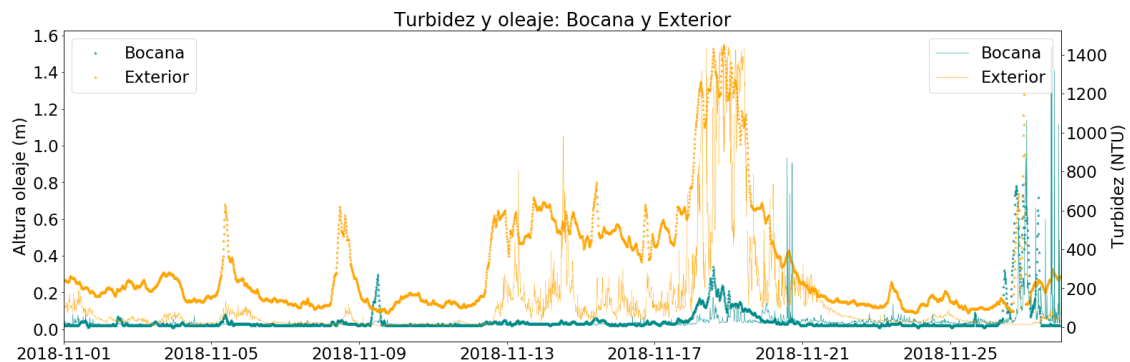


Figura 26 Turbidez (NTU) registrada por los sensores OBS y altura de ola significativa (m) en las estaciones de fondeo de Bocana (azul) y Exterior (naranja).

En el caso de la estación de Bocana, la turbidez tiene valores medios cercanos a 0, sin embargo, durante los días de oleaje producido por vientos del NE, alcanza valores de 100 NTU. Cuando el oleaje procede del NW, al ser más intenso en este punto, la turbidez aumenta entorno a las 400-600 NTU.

De igual forma, en la estación de Exterior la turbidez también sigue el patrón del oleaje. Durante los episodios de oleaje procedente del NE, cuando es más intenso en este punto, la turbidez llega a valores de 1000-1400 NTU. Sin embargo, cuando procede del NW, por lo general, no supera las 200 NTU.

#### 5.1.5. Temperatura en el fondo

Otras variables registradas en continuo por los sistemas de fondeo que muestran de forma directa la respuesta física de la bahía del Fangar a los cambios ambientales, son la temperatura y la presión en el fondo (a unos 4 metros en el sensor de Bocana y a unos 7 metros en la zona Exterior).

En la Figura 27 se observa una temperatura relativamente estable entorno a 17°C en los dos puntos analizados (unas décimas más altas en la zona exterior). A partir del día 11



aproximadamente, las temperaturas en ambas estaciones aumentan suavemente hasta alcanzar los 18°C.

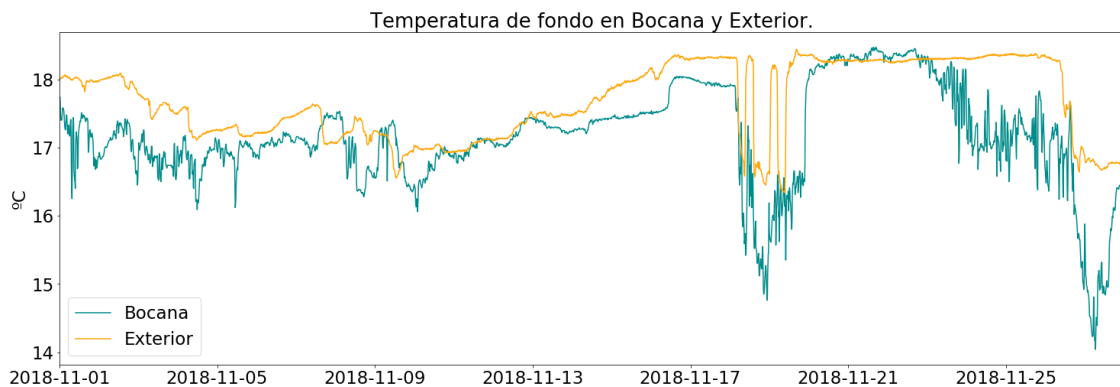


Figura 27 Temperatura de fondo en Bocana (4 metros) y en Exterior (7 metros).

Rompiendo con la estabilidad, entre los días 18 y 20, se produce un episodio de bajada drástica (unos 2°C) seguida de una recuperación a los valores anteriores. Este suceso ocurre en tres ocasiones durante estos días en la zona exterior.

Antes de terminar el mes de noviembre, destaca una nueva bajada de las temperaturas. Este cambio de temperaturas se produce con cierto desfase temporal entre ambas estaciones. Entorno al día 22, en la bocana empiezan a disminuir las temperaturas de forma irregular hasta alcanzar cerca de los 14°C el día 27. En la zona Exterior, esta bajada se produce el día 26 pero de forma menos intensa, estabilizándose entorno a los 17°C.

#### 5.1.6. Nivel del mar

En cuanto a la presión de la columna de agua, su análisis nos permite a partir de una serie de cálculos explicados en el capítulo 4.3.5 *Nivel del mar y seiches*, describir la evolución del nivel del mar. Gracias a que en las estaciones meteorológicas también se dispuso un sensor de nivel, es posible estudiar estas variaciones en cuatro puntos: en Bocana y en Exterior, a partir de los sensores de presión en el fondo; y en Ampolla y Batea, a partir de los sensores de nivel de las estaciones meteorológicas.

La Figura 28 presenta la evolución del nivel del mar registrada considerando tanto la marea astronómica como la meteorológica. Tal como se puede observar, en todas las estaciones se desarrolla un patrón similar. Por lo general, se aprecian oscilaciones diarias de unos 20cm, lo que correspondería al ciclo habitual de marea astronómica.

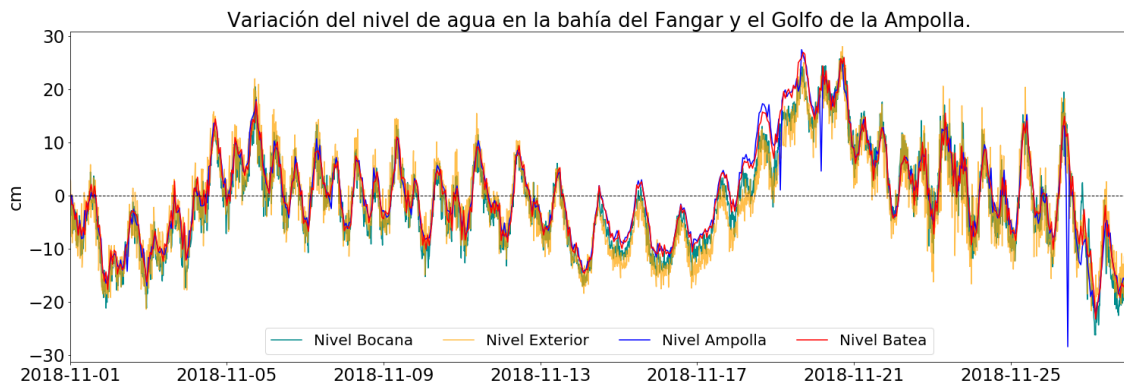


Figura 28 Variación del nivel del mar en la Bahía del Fangar y el Golfo de la Ampolla. Estas oscilaciones se han calculado en función del nivel medio del agua en cada punto.

Dejando de lado las variaciones de nivel de ciclo diario, se pueden apreciar unos cambios a nivel más global. Entre los días 12 y 18 se observa una disminución general de 10 cm aproximadamente con respecto al nivel medio. A partir del día 18, el nivel empieza a aumentar llegando a incrementos máximos de 30 cm entre los días 18-20 y a partir del día 21, el nivel se mantiene entorno al nivel medio con las oscilaciones propias del ciclo de marea astronómica.

#### 5.1.7. Marea astronómica y marea meteorológica

Una vez realizado el análisis de las variaciones de nivel del mar de manera general, es oportuno dedicar un capítulo a distinguir las componentes que influyen en dichas variaciones:

- Las mareas astronómicas, que son oscilaciones periódicas del nivel del mar generadas por las fuerzas gravitacionales que actúan sobre la tierra. El análisis de las mareas astronómicas comprende el análisis e identificación de sus principales componentes armónicos, las mareas parciales. El análisis de armónicos es el proceso matemático por el cual la marea o corriente de marea

observada en un lugar dado se separa en sus elementos armónicos componentes básicos [16].

- Las mareas meteorológicas, que son oscilaciones aleatorias inducidas por la acción de la presión atmosférica o por la fuerza del viento sobre la superficie del agua. Un ejemplo particular de lo anterior son las seiches.

Estudios anteriores han determinado la existencia de seiches en la bahía del Fangar con una periodicidad de 1 hora aproximadamente [16]. A lo largo del capítulo 5.1.3 *Corrientes*, las corrientes más intensas se han identificado en Bocana. Dado que las corrientes y las seiches están directamente relacionadas, se ha considerado oportuno analizar este fenómeno únicamente en Bocana.

En primer lugar, en la Figura 29 se presenta la componente de marea astronómica calculada mediante el módulo *ttide* tal como se ha explicado en el capítulo de la metodología *Presión en el fondo y seiches*. Esta figura corresponde con la sobreelevación del nivel del mar provocada por las fuerzas generadoras de mareas (fuerza centrífuga y fuerza de atracción gravitatoria).

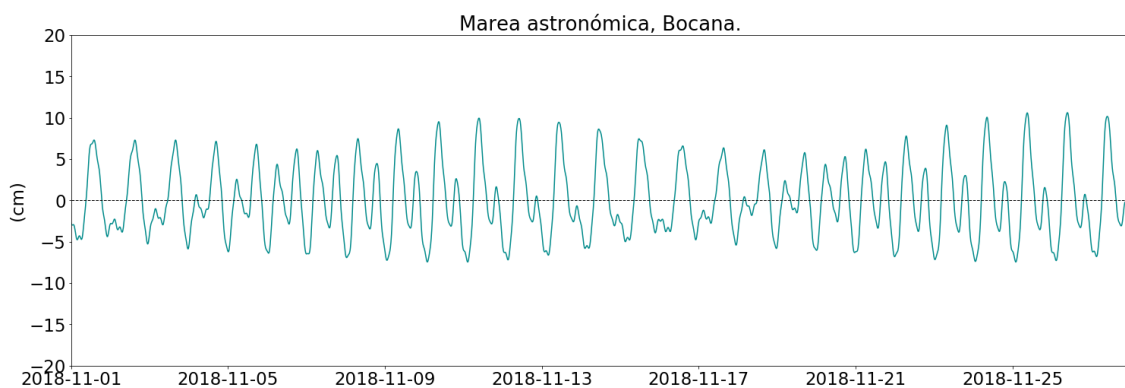


Figura 29 Componente de marea astronómica, corresponde con la variación del nivel del mar producida por las fuerzas de atracción gravitatoria en Batea.

La marea astronómica se constituye a partir de la suma de los diferentes componentes armónicos. En la tabla 9 se recogen los principales.

Tabla 9 Componentes armónicos principales.

Nombre	Símbolo	Frecuencia (h)	Amplitud (m)	Fase
Componente lunar diurno	O1	0.0387307	0.0181	32.14
Componente diurno lunisolar	K1	0.0417807	0.0389	6.95
Componente lunar semidiurno	M2	0.0805114	0.0394	8.75
Componente solar semidiurno	S2	0.0833333	0.0160	236.52

En función del comportamiento de la marea a lo largo del día, se puede clasificar en: diurna (hay una única bajamar y pleamar), semidiurna (hay dos bajamares o pleamares semejantes entre ellas) o mixta (hay dos bajamares o pleamares de amplitud variable entre ellas). Se puede determinar el tipo de marea a partir del factor de forma teniendo en cuenta la amplitud los principales armónicos de marea diurnos y semidiurnos:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (9)$$

Los valores del factor de forma (F) entre 0 y 0,25 corresponden a mareas semidiurnas, entre 0,25 y 1,5 a marea mixta principalmente semidiurna, entre 1,5 y 3 a marea mixta principalmente diurna y valores superiores a 3 a marea diurna. Tras realizar la ecuación 9, el factor de forma resultante para este caso de estudio es de 1,03. Por lo tanto, se trata de una marea mixta con predominio semidiurno.

Una vez eliminada la componente de marea astronómica, se obtiene una variable denominada “residuo” que corresponde con la sobreelevación del nivel del mar producida por variaciones de presión atmosférica y fenómenos meteorológicos (seiches). Antes de proseguir al análisis de esta serie, es oportuno calcular el periodo aproximado de oscilación de la propia bahía con tal de obtener un valor de referencia para comparar los resultados.

A partir de la relación entre la longitud de la bahía y su profundidad media, aplicando la ecuación 10 se obtiene dichos periodos oscilación.

$$T_n = \frac{4L}{\sqrt{gh}} \quad (10)$$

La longitud de la bahía del Fangar es de 6 Km (desde el extremo más interior hasta la Bassa de les Olles) y la profundidad media de 2 a 4 metros. Por tanto, el periodo de oscilación varía entre 1,5 y 1,06 horas.

Para que se considere que en un cierto periodo hay seiches, se han determinado unas condiciones de duración e intensidad basadas en estudios anteriores: se considera que existe un fenómeno de seiche cuando la duración de una oscilación del nivel mar es mayor a 2 días; o para duraciones inferiores, su máxima amplitud de oscilación debe ser superior a los 10 centímetros [6]. La Figura 30 presenta la serie temporal del residuo de la elevación del mar. Los recuadros rojos indican las seiches más significativas, es decir, aquellas con oscilaciones mínimas de 10 cm en periodos de una hora y media aproximadamente.

A priori se identifican cuatro periodos durante los que se desarrollan seiches significativas:

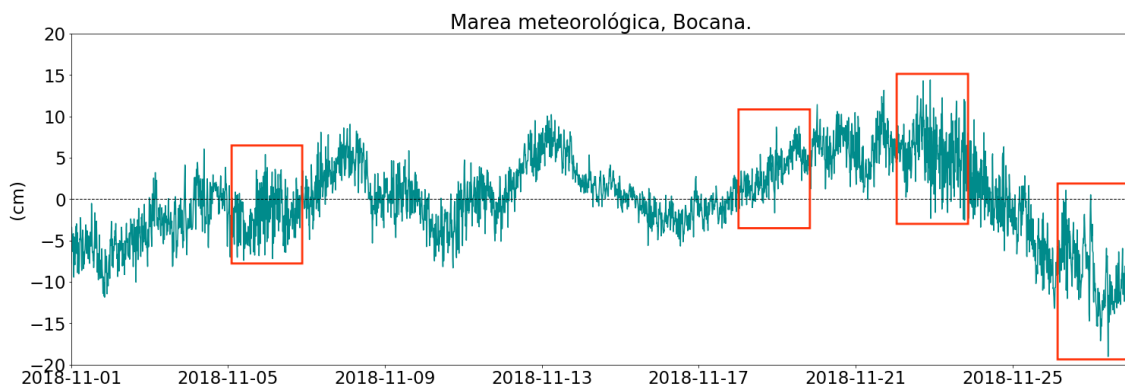


Figura 30 Serie temporal de marea meteorológica en la estación Bocana, representa el valor residuo una vez eliminadas las mareas astronómicas. En rojo se identifican los periodos de seiches más intensas.

La Figura 31 presenta los cuatro episodios de seiches mencionados anteriormente. Tal como se puede observar, a pesar de que no hay grandes diferencias entre ellos, si que se puede apreciar más intensidad durante el tercer y cuarto episodio.

## Análisis experimental de la hidrodinámica y calidad de las aguas en la Bahía del Fangar

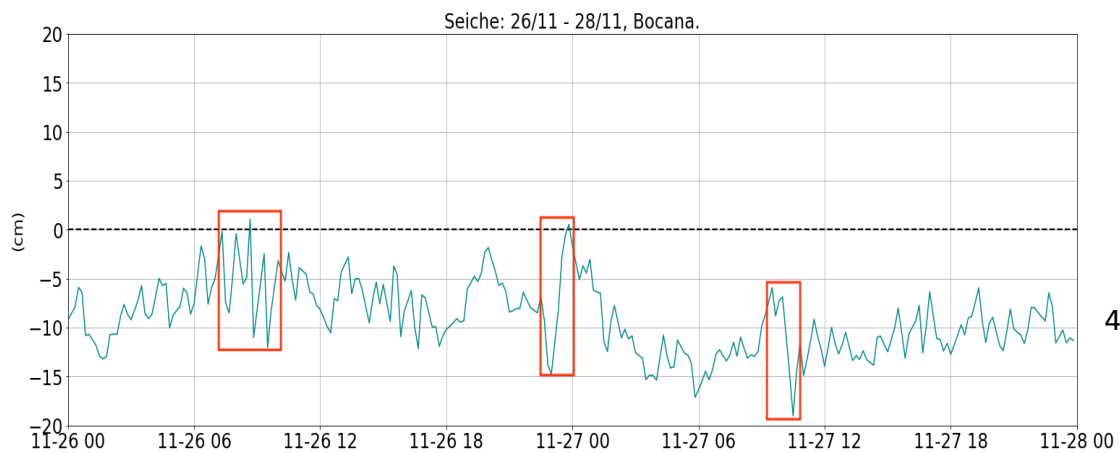
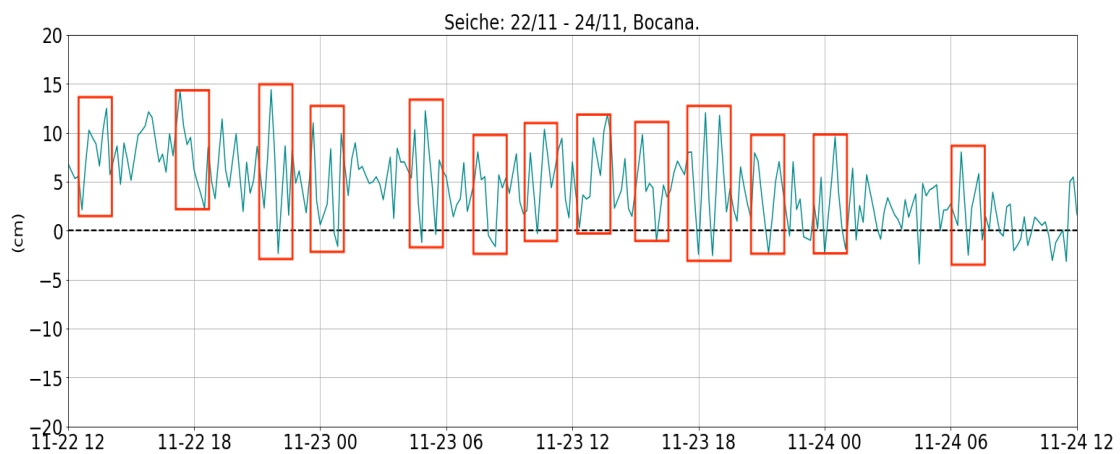
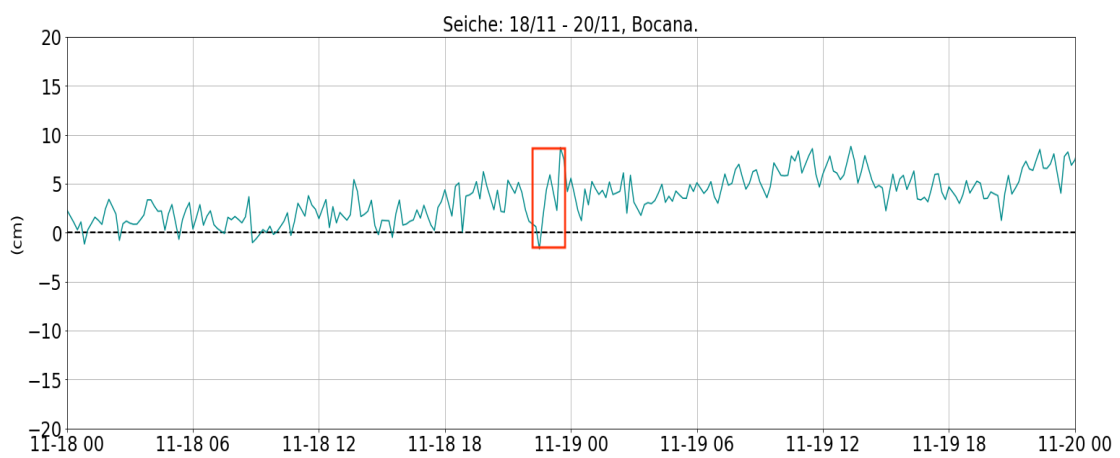
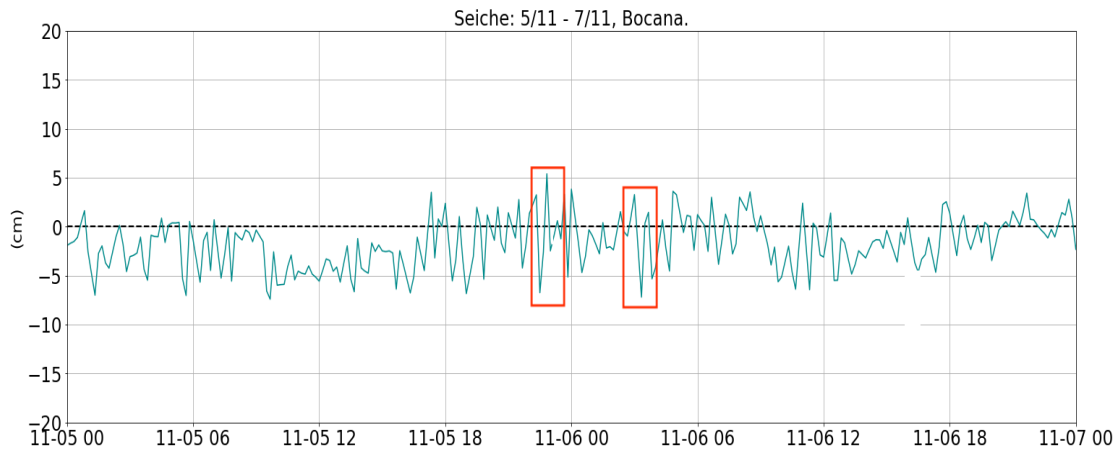


Figura 31 Episodios de seiches significativas durante el periodo de estudio.

## 5.2. Perfiles verticales

A continuación, se analizan todos los resultados obtenidos durante las campañas CTD de los días 8 y 22 de noviembre. Se examina cada variable por separado (temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y turbidez) a partir de dos análisis: en primer lugar, se estudia el perfil vertical de todas las estaciones en relación con dicha variable. A continuación, se realiza un análisis espacial de los datos en diferentes profundidades (superficie, a dos y a cuatro metros de profundidad) y en dos secciones verticales (zona exterior y bocana). En los anexos se recogen las figuras correspondientes a otras profundidades y a otros transectos.

### 5.2.1. Temperatura

Los gráficos de la Figura 32 presentan los perfiles de temperatura obtenidos durante la campaña (días 8 y 22) en todas las estaciones. Desde una perspectiva global, el día 22 se puede apreciar un aumento generalizado de la temperatura del agua con respecto al día 8. Este aumento de unos 2°C se produce sobretodo a partir de 1 metro de profundidad. Sin embargo, la temperatura en la superficie disminuye.

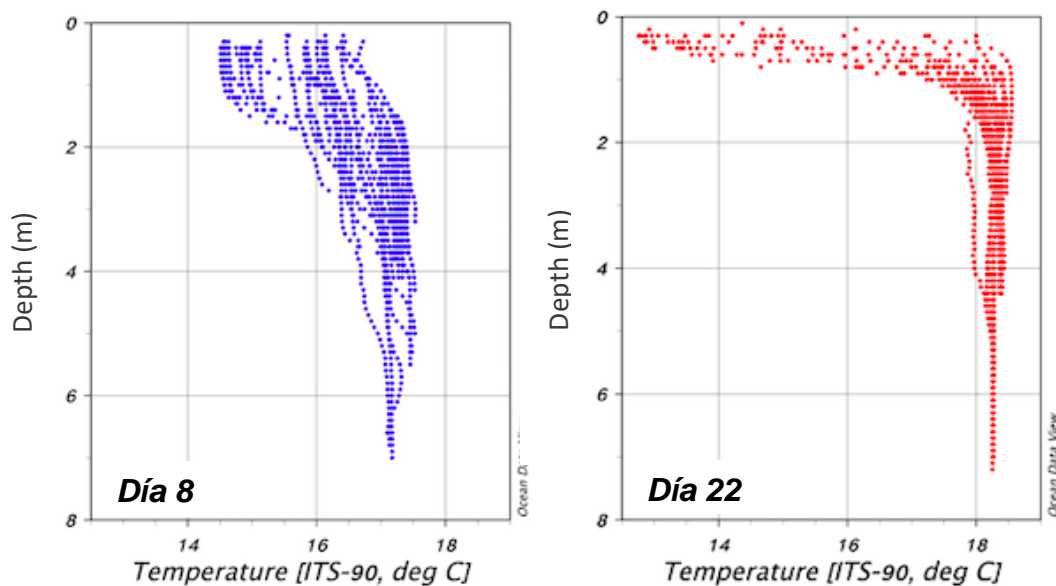


Figura 32 Perfiles de temperatura (°C) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22.

Tal como se puede observar en la Figura 33, analizando la distribución espacial de la temperatura el día 8 de noviembre, se pueden distinguir dos zonas: el interior de la bahía, con las temperaturas más bajas (entorno a los 15°C); y el exterior, con las más altas (unos 16°C).

A medida que aumenta la profundidad, esta configuración se invierte: la temperatura más elevada se da en la zona interior de la bahía (entre 17-18°C) y la más baja el exterior (entre 16-17°C). A una profundidad de dos metros aproximadamente, se puede distinguir una tercera zona con temperaturas todavía más bajas (hasta 16°C).

Los perfiles verticales de temperatura muestran que se produce estratificación en la columna de agua. Las temperaturas en superficie, tal como se ha mencionado anteriormente, son más bajas que en profundidad. Por diferencias de densidad, el agua más fría tiende a situarse en el fondo a no ser que esta agua fría sea dulce, lo que disminuye su densidad situándola en la superficie.

En la Figura 34 se presenta la distribución espacial de la temperatura para el día 22 de noviembre. Al igual que el día 8, en la zona interior de la bahía las temperaturas en superficie son inferiores (13-15°C) a las del exterior (15-16°C). En el Golfo de la Ampolla se distingue una zona con temperaturas más altas (16-18°C).

A medida que aumenta la profundidad, ocurre lo mismo que en el caso del día 8. La temperatura más elevada pasa a estar en la zona del interior de la bahía (unos 19°C) y la más baja en el exterior (18°C aproximadamente).

Los perfiles verticales de temperatura muestran una estratificación todavía más marcada en comparación con la del día 8. Este contraste se produce como resultado de la disminución de temperatura en superficie y el aumento de la temperatura del agua por debajo del primer metro.



Temperatura: 8/11/2018

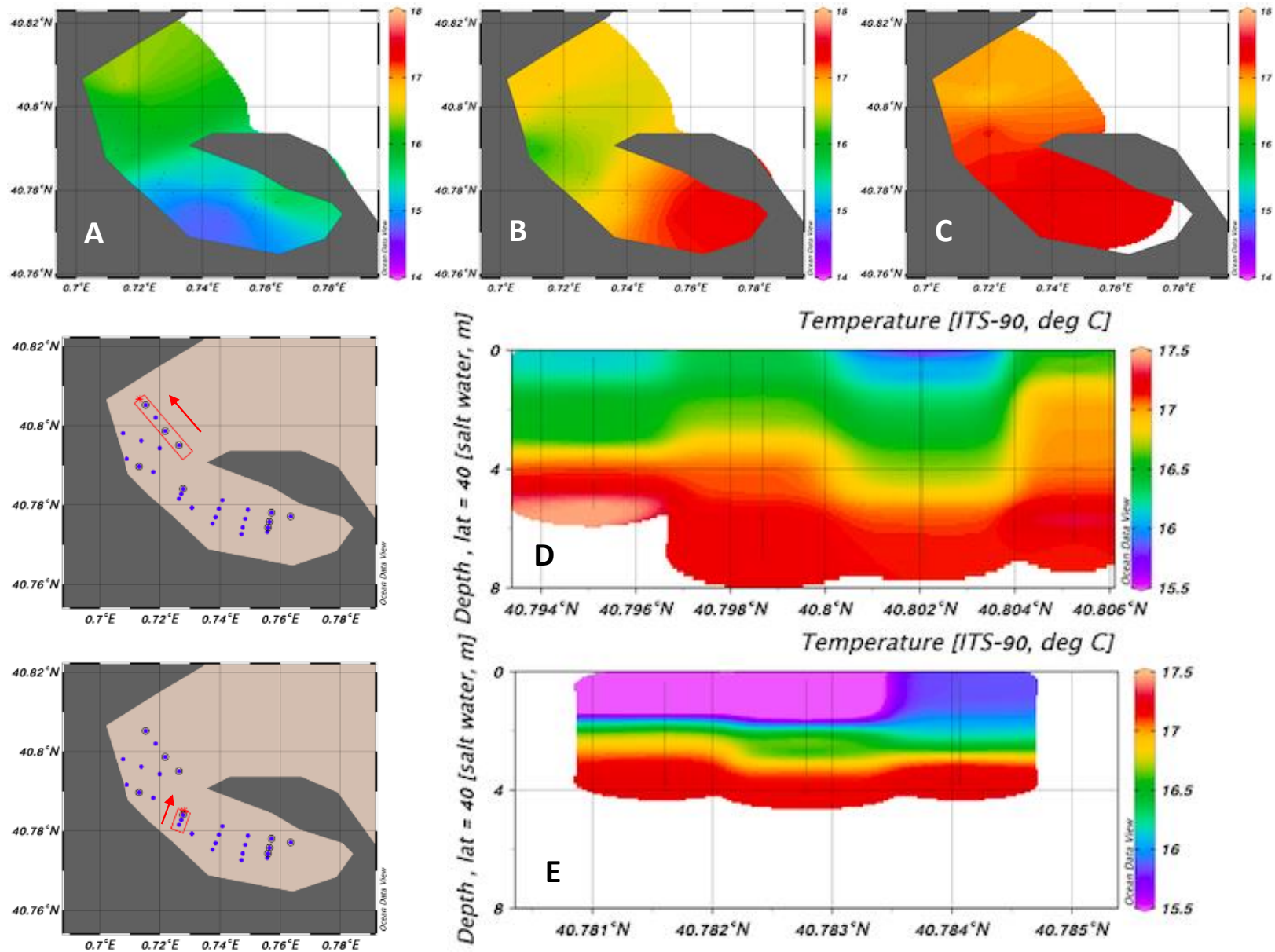


Figura 33 Arriba: temperatura en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: temperatura en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre.

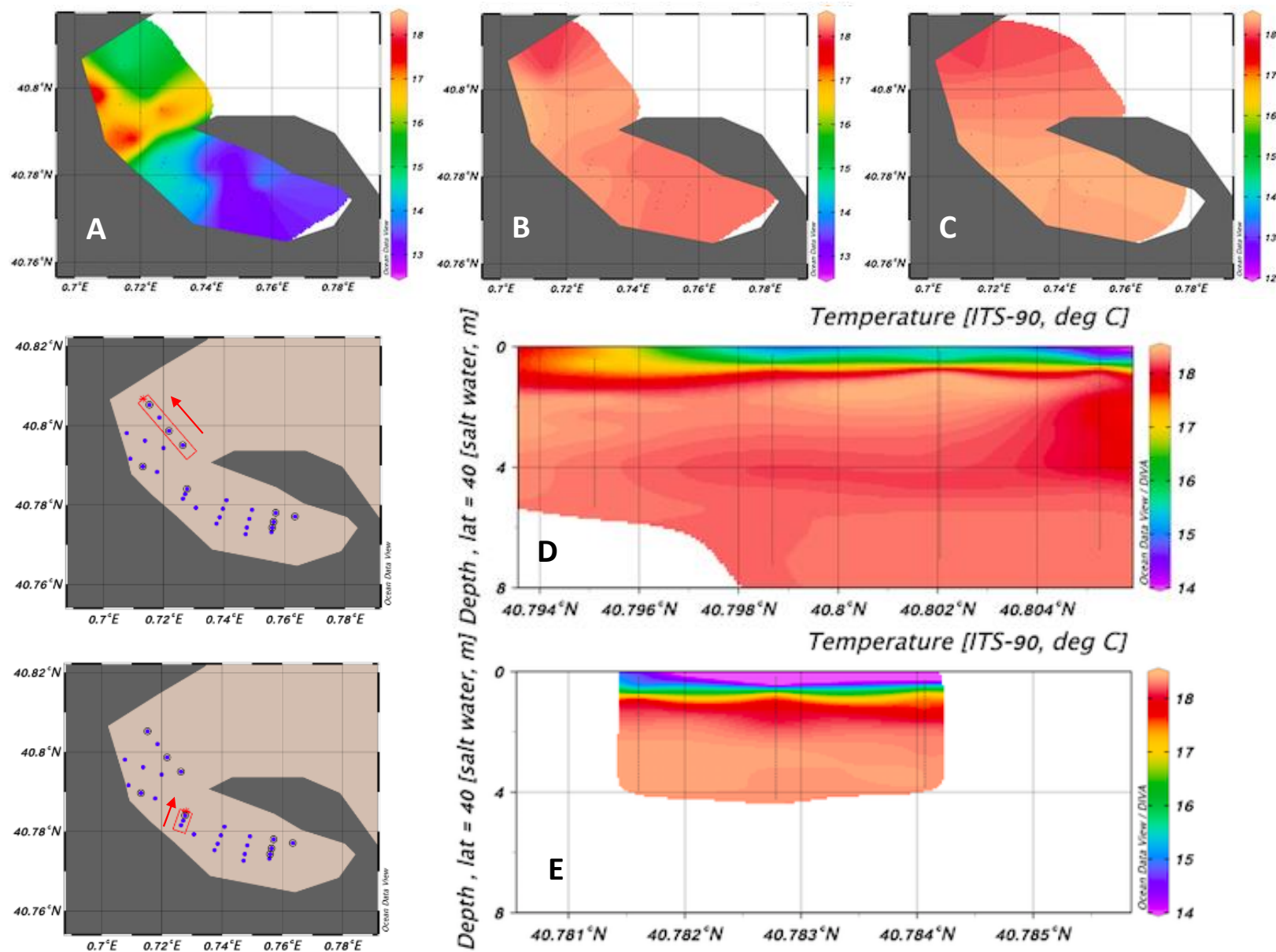


Figura 34 Arriba: temperatura en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: temperatura en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre.

### 5.2.2. Salinidad

Los gráficos de la Figura 35 presentan los perfiles de salinidad obtenidos durante la campaña (días 8 y 22) en todas las estaciones. El día 8 presenta una capa de agua menos salada más gruesa (entorno a los dos metros) en relación con el día 22 (un metro aproximadamente). A partir de los dos metros de profundidad no se presentan diferencias destacadas entre ambas situaciones, lo que corresponde con el agua marina que entra a la bahía por debajo de la capa de agua dulce superficial. Se puede observar que el día 22 presenta una haloclina muy pronunciada entorno a un metro de profundidad.

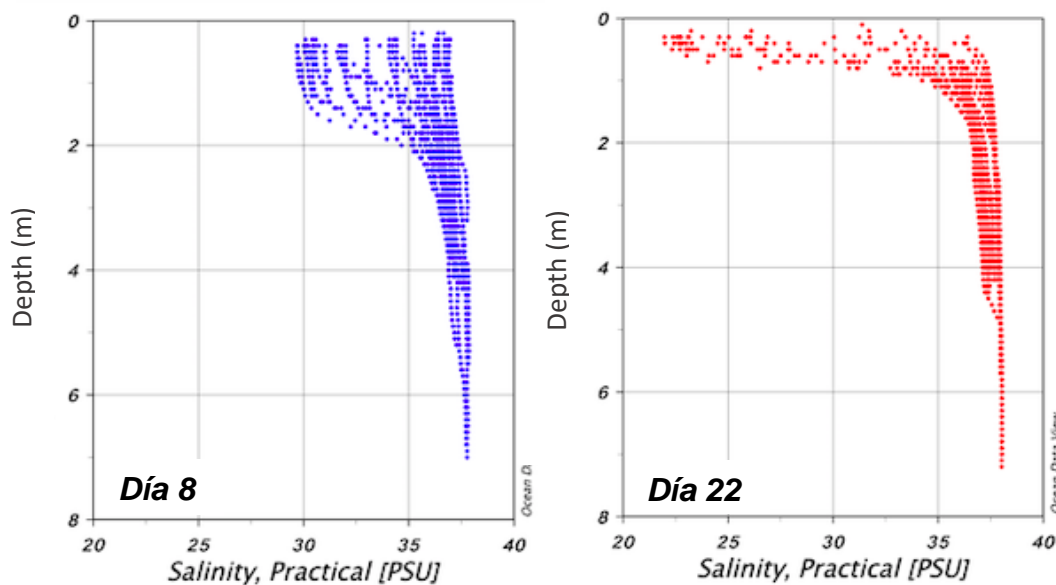


Figura 35 Perfiles de salinidad (PSU) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22.

Tal como se puede observar en la Figura 36, analizando la distribución espacial de la salinidad en superficie el día 8 de noviembre, al igual que con la temperatura, se pueden distinguir dos zonas: el interior de la bahía, con salinidades más bajas (por debajo de 34 PSU); y el exterior con concentraciones más altas (entre 35 y 37 PSU).

A medida que aumenta la profundidad, esta diferenciación entre interior y exterior desaparece. Coincidiendo con los perfiles verticales de la Figura 35, el día 8 a partir de los 2 metros la salinidad en la columna de agua es más homogénea (entorno 35-37 PSU); el día 22 esto ocurre a partir de 1 metro. El día 8, a una profundidad de dos metros aproximadamente, se puede distinguir una zona con salinidades más bajas (35 PSU), lo

que correspondería con el punto donde se ubica uno de los canales de desagüe. El agua que se vierte por este punto, al ser más dulce, cuando se mezcla con el agua de la bahía, reduce su salinidad.

En la Figura 37 se presenta la distribución espacial de la salinidad para el día 22 de noviembre. Al igual que el día 8, en la zona interior de la bahía la salinidad en superficie es inferior (por debajo de 30 PSU) a las de exterior (entre 30-35 PSU). A medida que aumenta la profundidad, la salinidad incrementa en ambas zonas. Sin embargo, se sigue apreciando una salinidad menor en la zona interior de la bahía.

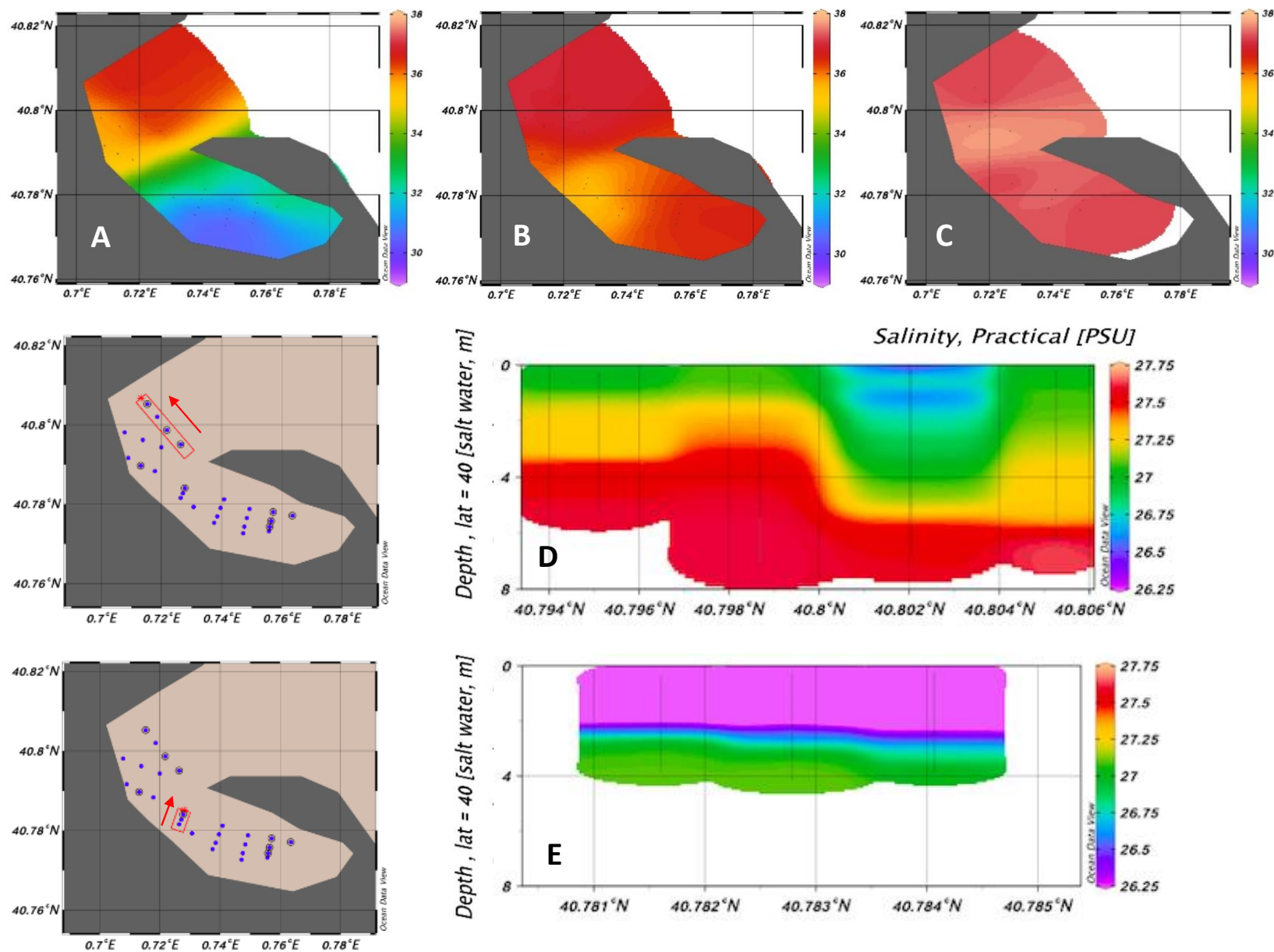


Figura 36 Arriba: salinidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre



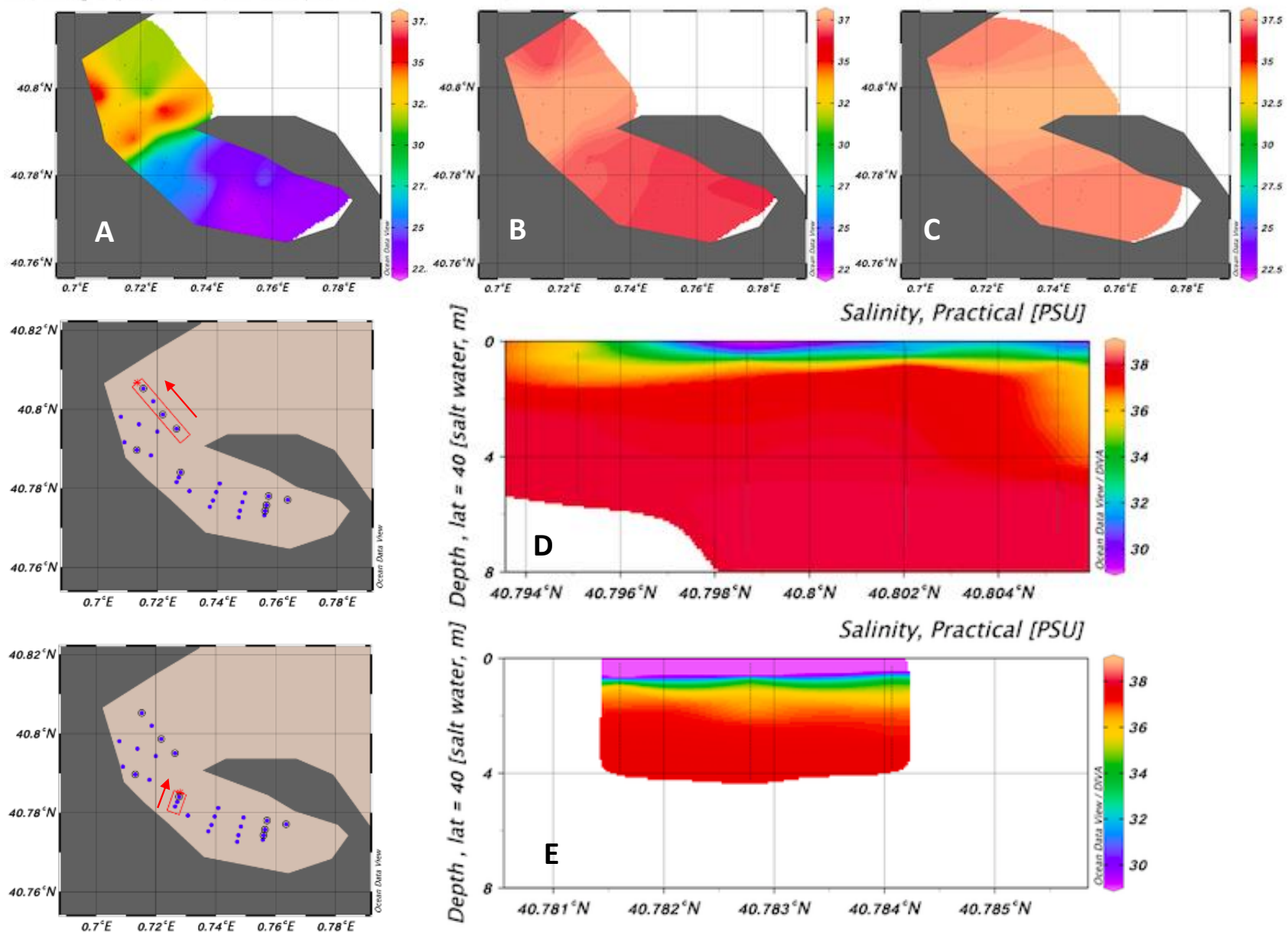


Figura 37 Arriba: salinidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre

### 5.2.3. Densidad

La Figura 38 presenta los perfiles de densidad obtenidos durante la campaña (días 8 y 22) en todas las estaciones. Tal como se puede observar, siguen la misma tendencia que las variables anteriores, ya que la densidad depende de la temperatura y de la salinidad. Las masas de agua fría y las saladas, son más densas que las calientes y las dulces. Es por ello por lo que el agua marina penetra en la bahía por debajo de una capa superficial más dulce.

Coincidiendo con la temperatura y la salinidad, se puede observar la existencia de pycnoclinas ambos días, a 2 metros el día 8 y a 1 metro el día 22.

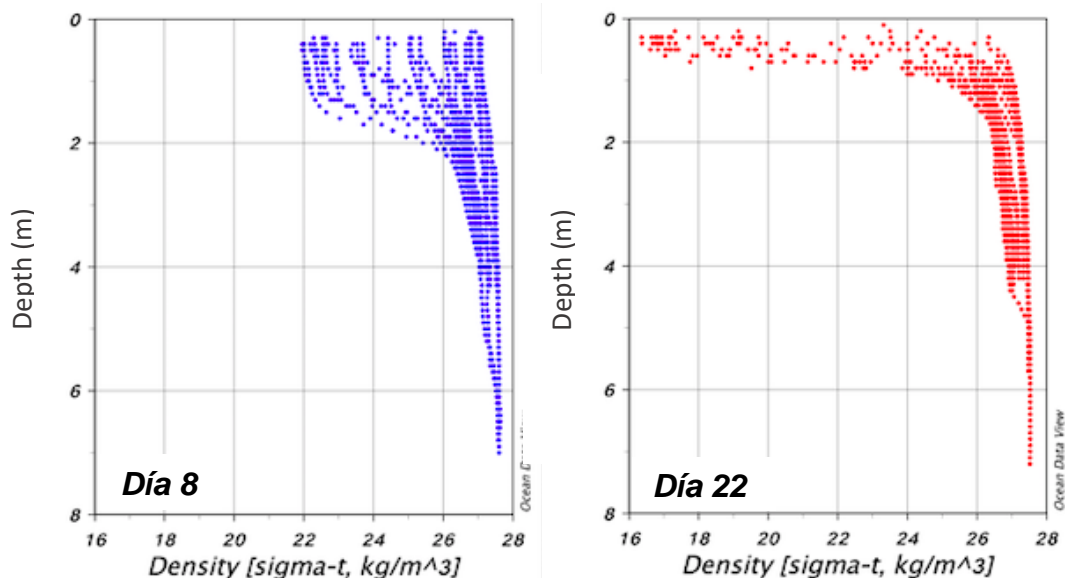


Figura 38 Perfiles de densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22.

Tal como se puede observar en las Figura 39 y 40, donde se presenta la distribución espacial de la densidad ambos días, sigue el mismo patrón que la salinidad, por lo que no se va a profundizar en la descripción de las figuras.

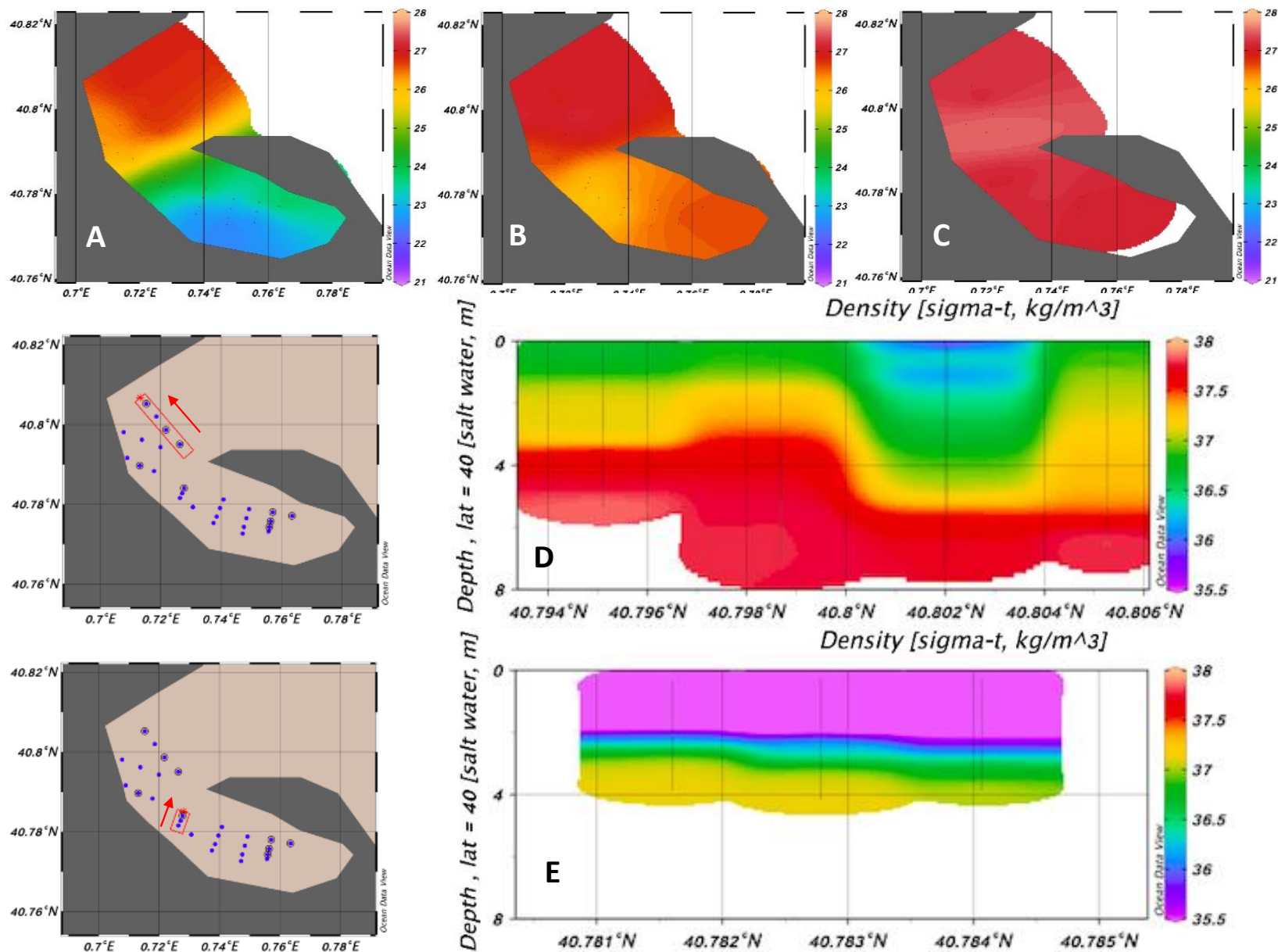


Figura 39 Arriba: densidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre



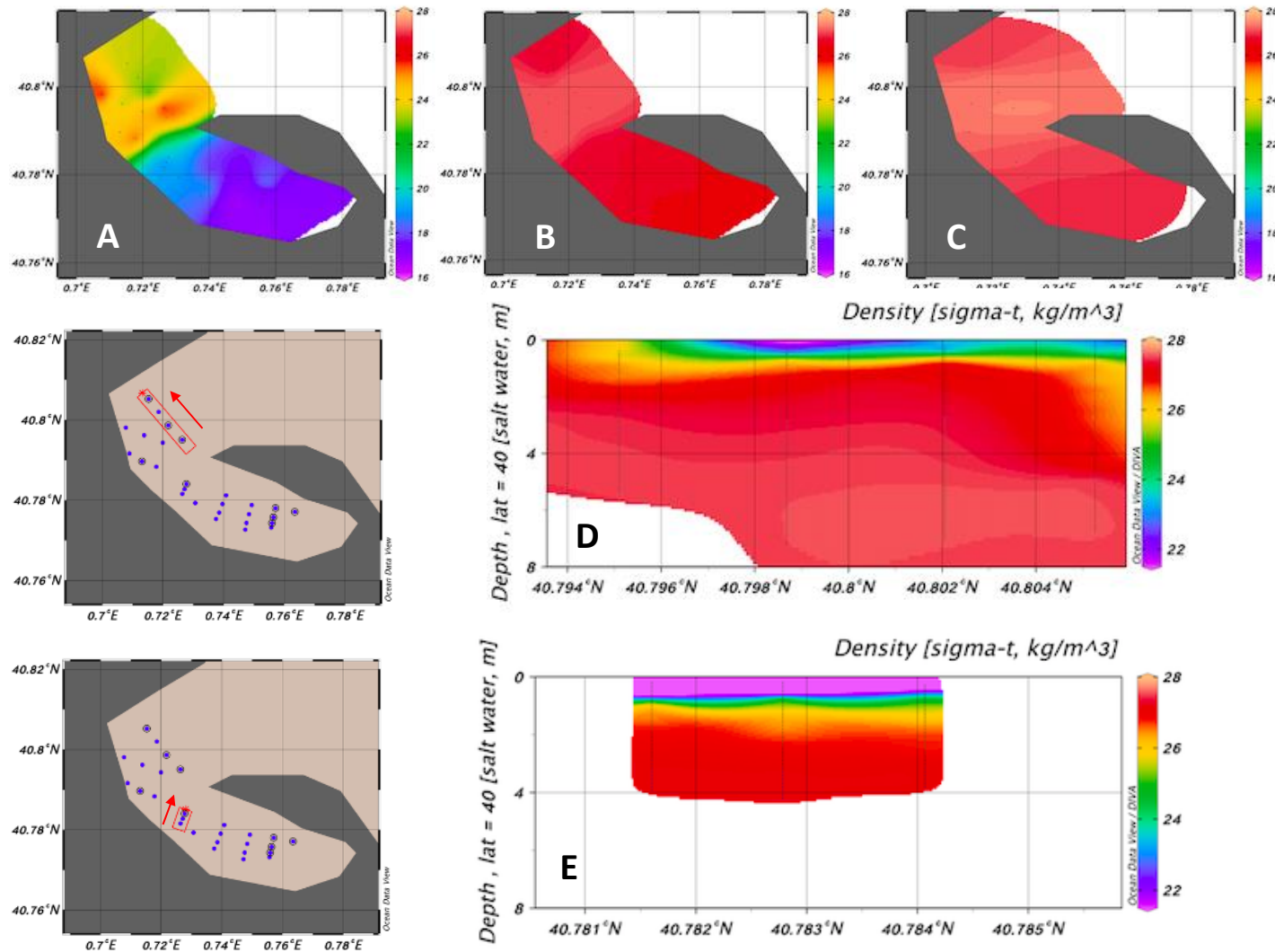


Figura 40 Arriba: densidad en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: salinidad en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre.

#### 5.2.4. Oxígeno disuelto

Los gráficos de la Figura 41 presentan los perfiles de oxígeno disuelto (OD) obtenidos durante la campaña (días 8 y 22) en todas las estaciones. El día 8 presenta unas concentraciones de OD entre 5 y 8 mg/l más o menos homogéneas en la columna de agua, es decir, no se presentan diferencias destacadas entre la superficie y el fondo. El día 22 presenta un rango de concentraciones mayor, entre 4.5 y 10 mg/l. En este caso, se observan diferencias entre los primeros metros desde la superficie y el fondo, siendo las capas superficiales las que presentan mayores concentraciones de OD.

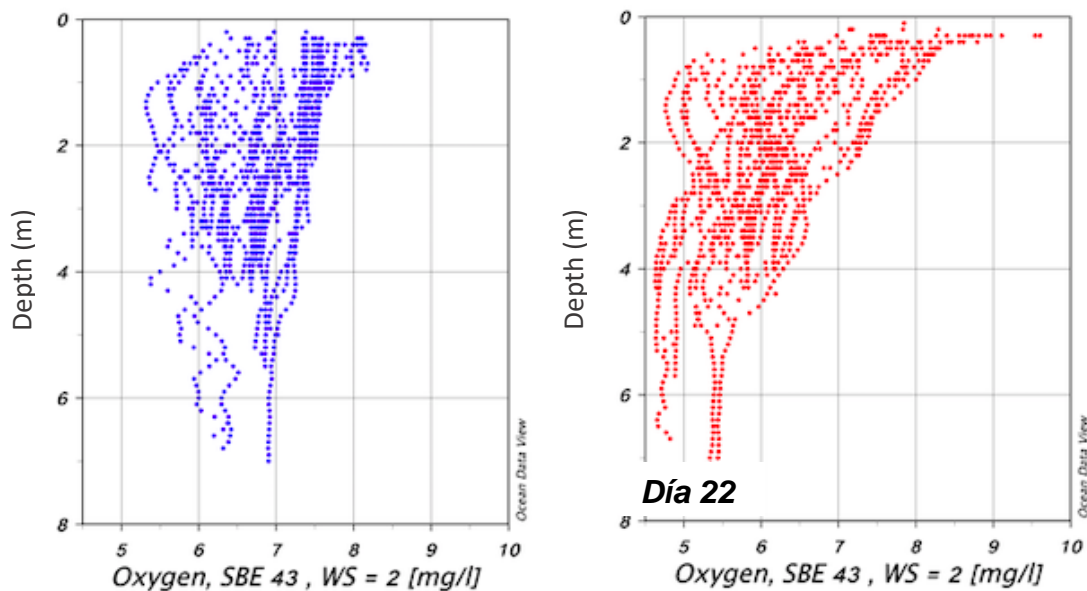


Figura 41 Perfiles de oxígeno disuelto (mg/l) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22.

Tal como se puede observar en la Figura 43, las zonas más someras son las que presentan valores de OD más elevados. En profundidad, se observa una tendencia a la reducción.

A medida que aumenta la profundidad, se pueden apreciar diferencias entre la zona de la bahía (concentraciones de OD más bajas) y el golfo de la Ampolla (concentraciones más altas).

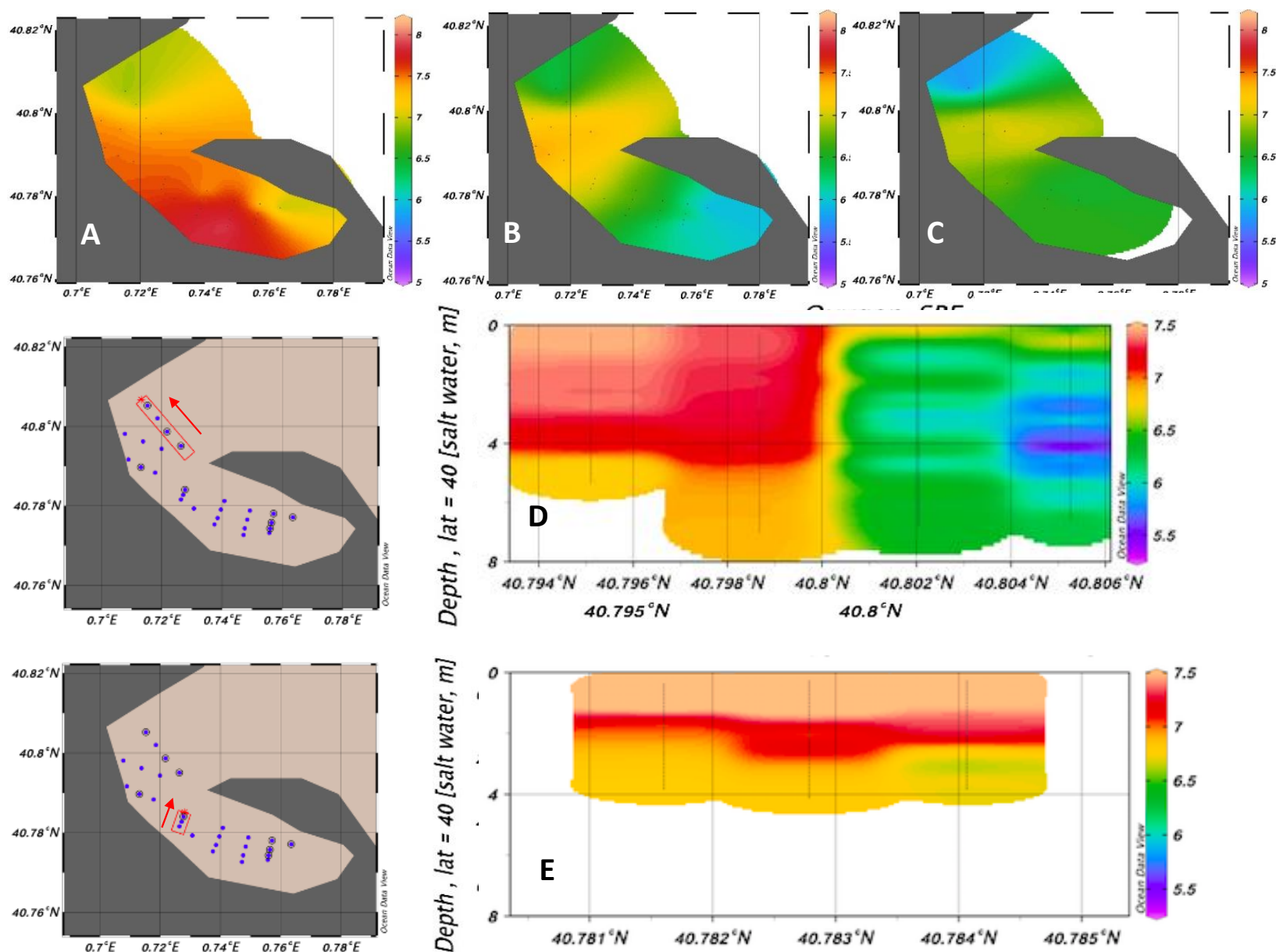


Figura 42 Arriba: oxígeno disuelto (mg/l) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: oxígeno disuelto en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre 60

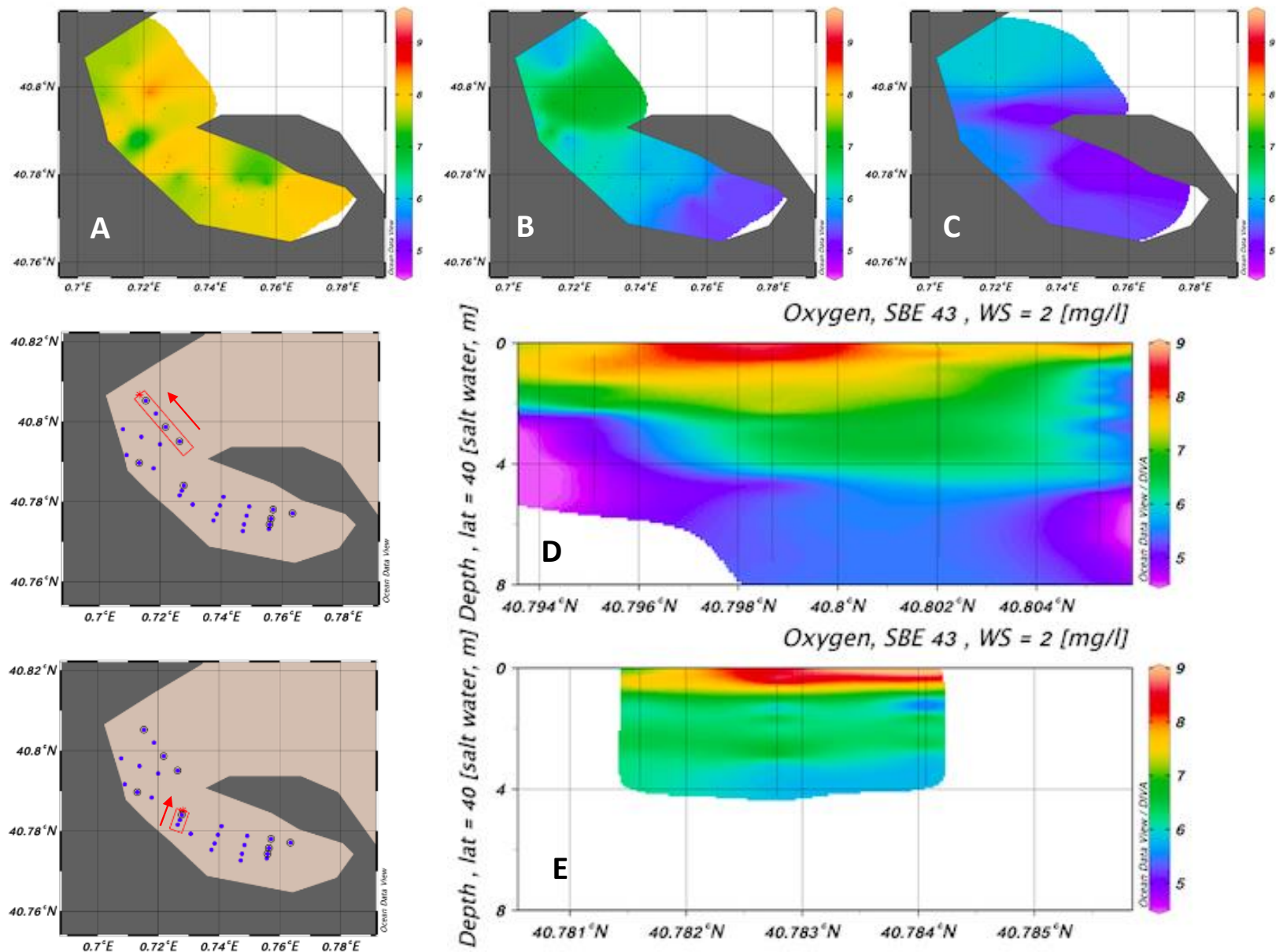


Figura 43 Arriba: oxígeno disuelto (mg/l) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: oxígeno disuelto en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre

### 5.2.5. Turbidez

Los gráficos de la

Figura 44 presentan los perfiles de turbidez obtenidos durante la campaña (días 8 y 22) en todas las estaciones. Desde una perspectiva global, el día 22 se puede apreciar un aumento generalizado de la turbidez en la columna de agua con respecto al día 8.

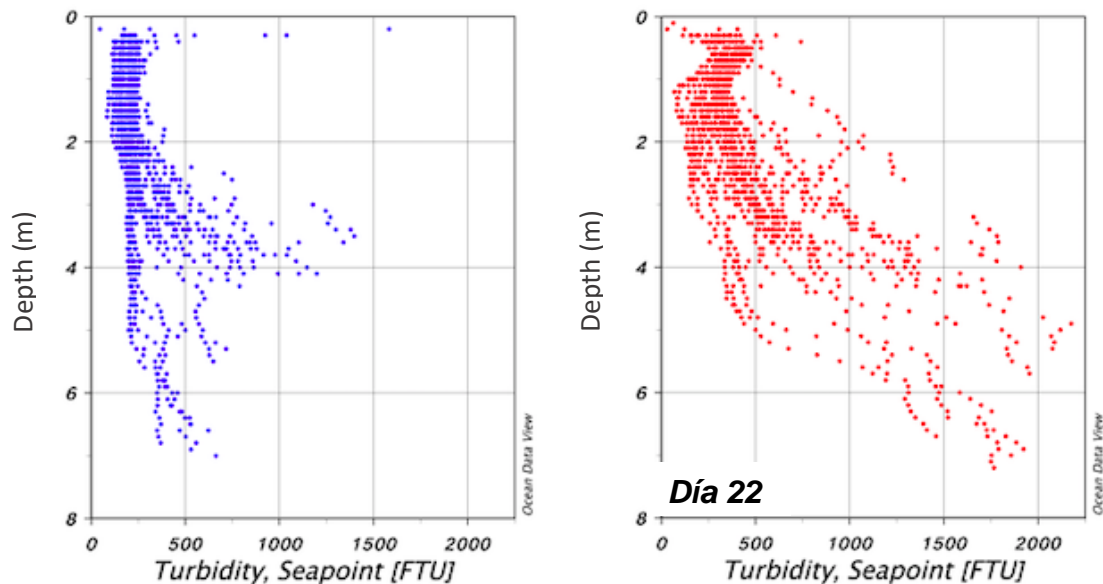


Figura 44 Perfiles de turbidez (FTU) en todas las estaciones del área de estudio. En azul, los resultados referentes al día 8 de noviembre; en rojo, los resultados del día 22.

Tal como se puede observar en la Figura 45, analizando la distribución espacial de la turbidez en superficie el día 8 de noviembre, se pueden distinguir dos zonas: la parte más interior de la bahía, con los valores de turbidez más bajos (100-250 FTU); y el exterior, con los más altos (250-350 FTU aproximadamente). A una profundidad de dos metros, la distribución espacial es prácticamente igual. Sin embargo, en el fondo, esta configuración se invierte: la turbidez es mayor en la zona interior de la bahía (entre 500-1000 FTU) y la menor en el exterior (250-350 FTU).

En la Figura 46 se presenta la distribución espacial de la turbidez para el día 22 de noviembre. Al igual que el día 8, en la zona interior de la bahía la turbidez en superficie es inferior (150-500 FTU) a la del exterior (500-700 FTU). A medida que aumenta la profundidad, ocurre lo mismo que en el caso del día 8. La turbidez más elevada pasa a estar en la zona del interior de la bahía (1000-1500 FTU) y la más baja en el exterior (500-1000 FTU aproximadamente).



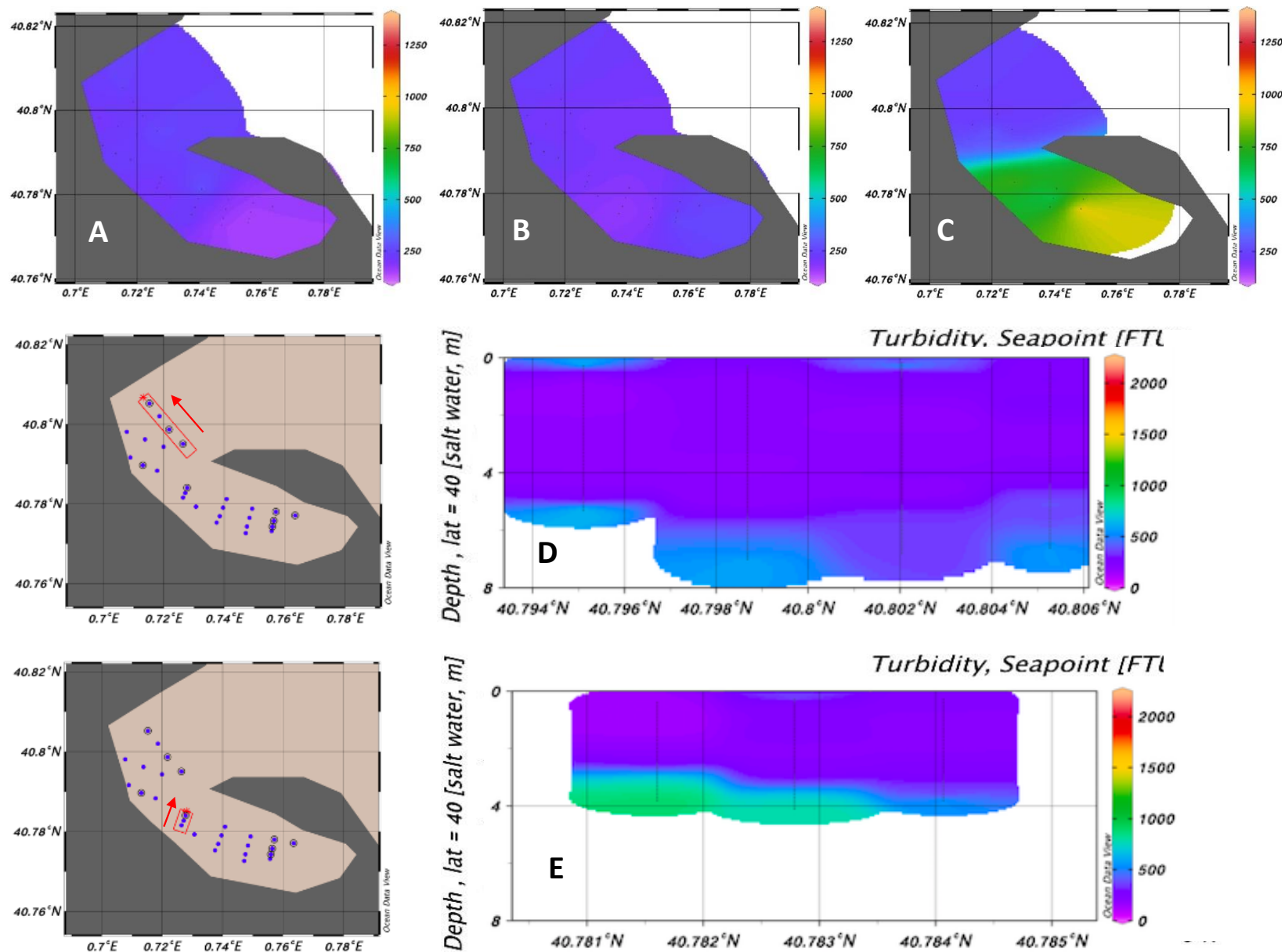


Figura 45 Arriba: turbidez (FTU) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: turbidez en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 8 de noviembre

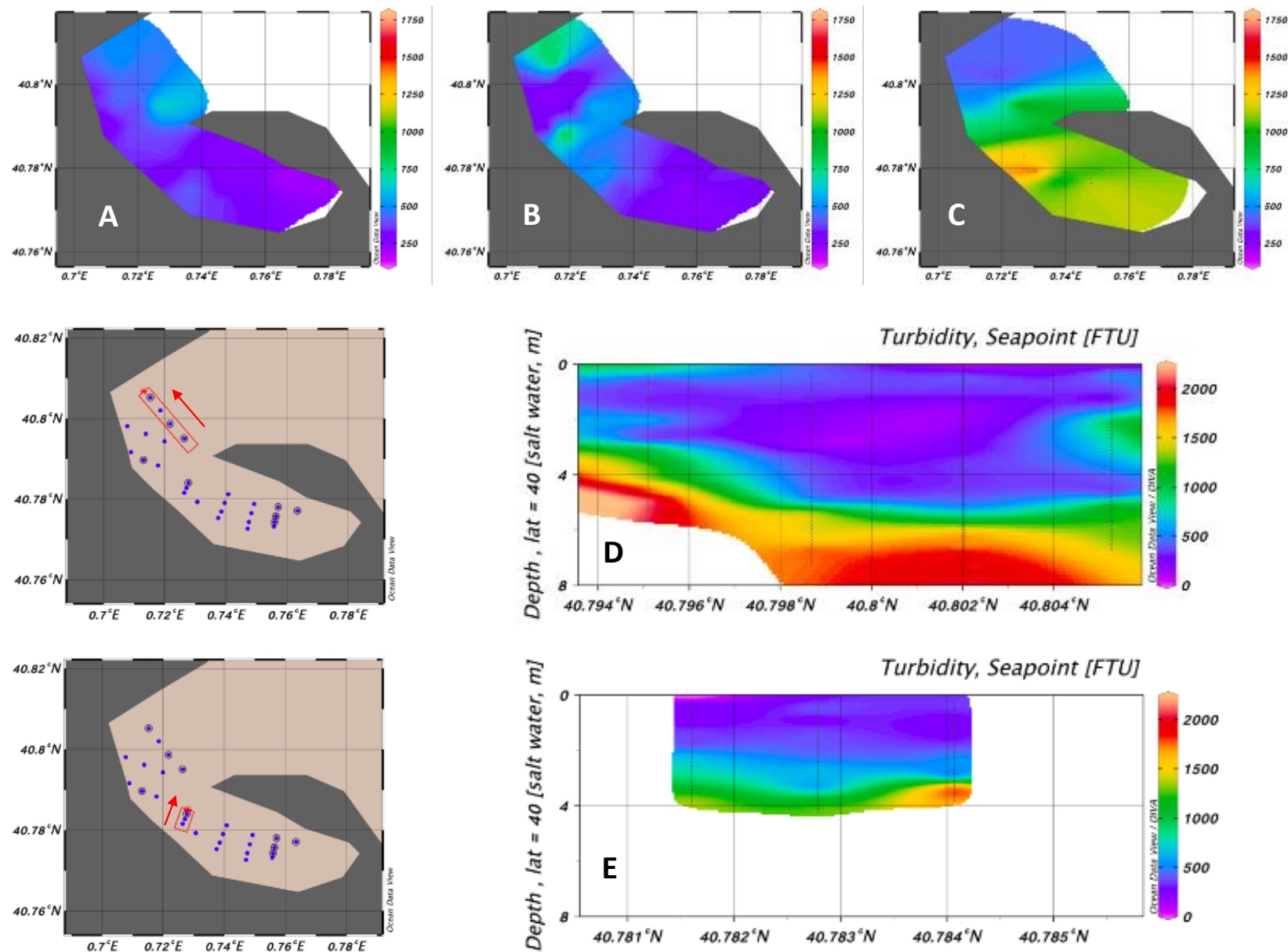


Figura 46 Arriba: turbidez (FTU) en superficie (A), a 2 metros (B) y a 4 metros de profundidad (C). Abajo: turbidez en los transectos "exterior" (D) y "bocana" (E). Día 22 de noviembre

## 6. Discusión

A continuación, se razona sobre los resultados obtenidos y presentados en el capítulo 5.

### 6.1. Series temporales

#### Meteorología

A modo de síntesis, se puede concluir que el mes de noviembre ha estado marcado por el paso de perturbaciones que han establecido flujos húmedos y cálidos de levante y flujos más secos y fríos de Mestral.

Las intensidades del viento en Batea prácticamente han duplicado a las de la Ampolla, esto se debe a la propia ubicación de la estación meteorológica. Por lo general, los vientos son más intensos sobre la superficie del mar, ya que presenta una rugosidad menor que la tierra y, por tanto, se pierde menos energía en la capa límite. Por otro lado, cabe destacar la alta variabilidad del viento en esta región, que queda muy determinado por la orografía local.

En relación con la temperatura, cabe destacar que ha alcanzado valores generalmente por encima de la media climática de noviembre [14], pudiendo ser resultado de este episodio de viento de levante más cálido.

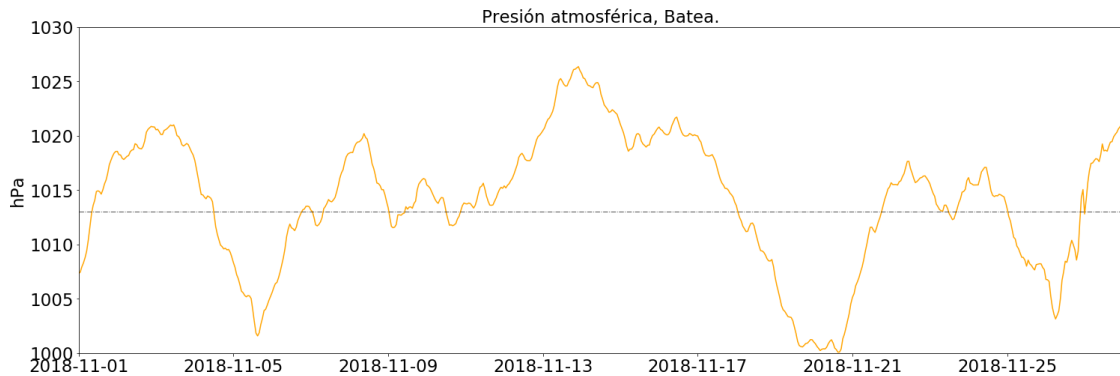
#### Caudales

Al comparar la Figura 19 con los registros de precipitación del Perelló, se puede afirmar que existe relación entre la precipitación y el aumento de los caudales aportados a la bahía del Fangar. Por lo general, los días posteriores a las precipitaciones más importantes, aumenta el desagüe a la bahía. Este hecho puede estar relacionado fundamentalmente con la precipitación sobre la extensa superficie de recogida de aguas del delta, que tiene gran multitud de canales que llevan el agua recogida hasta la bahía.

Por otro lado, la subida del nivel del mar ocasionada por las borrascas en la zona (bajas presiones), implica que las bombas necesiten trabajar más para evitar la entrada de agua más salada en los campos de cultivo. Es conveniente señalar que entre los días 19 y 23 se vertieron a la bahía grandes cantidades de agua por los canales de Illa de Mar y Bassa



de les Olles. Tal como se puede observar en la Figura 47, estos incrementos se pueden relacionar directamente con los cambios en la presión atmosférica, es decir, el paso de borrascas.



*Figura 47 Presión atmosférica (hPa) en Batea durante el noviembre de 2018.*

### Corrientes

El comportamiento de las corrientes en Bocana (Figura 24 – imágenes A y B) es más energético que en la zona exterior de la bahía (Figura 24 – imágenes C y D). Esto se debe al estrechamiento en la bocana que, al tener que pasar una misma cantidad de agua por una sección más estrecha, las corrientes se intensifican en este punto.

Tanto en Bocana como en Exterior, las corrientes más intensas en la columna de agua se dan en superficie. Este hecho es respuesta directa de la acción del viento, por lo que, a medida que desciende la profundidad, pierde influencia y la intensidad de la corriente se reduce.

Tal como se observa en las Figura 20 y 21, durante los días 19 y 20, la velocidad en el fondo aumenta hasta superar la velocidad en superficie (que disminuye). Durante estos días se produce episodio de viento fuerte de Mestral que podría afectar a la velocidad de la corriente en superficie, sin embargo, no justifica el aumento de velocidad en el fondo. A priori es difícil conocer el origen de estos cambios pero podría estar relacionado

con el vertido de agua desde tierra que se lleva a cabo durante estos días. Al ser más dulce y fría, la masa de agua desciende hasta el fondo y circula en profundidad.

#### Oleaje y turbidez

En la zona Exterior, los picos de oleaje más destacados coinciden con el final del episodio de viento NE (0-45°), los días 17-19 de noviembre, alcanzando alturas de incluso 1.6m. A pesar de ello, en la zona de Bocana, estos cambios inducidos por el viento de gregal y levante no son tan notorios, únicamente entre los días 18 y 19, cuando la velocidad del viento fue máxima, se observan cambios significativos al llegar a alturas de 0.3m. Este oleaje en Bocana durante el episodio de Gregal, puede deberse al fenómeno de difracción, que se produce cuando el oleaje en la zona exterior de la bahía se encuentra con la punta del Fangar. El proceso de difracción provoca que parte de la energía del oleaje que no ha encontrado interferencia pase a la zona interior de la bahía y genere ondas difractadas en su interior. Sin embargo, durante los días 26-28, cuando se produce el episodio de viento fuerte de Mestral (NW), el oleaje de la zona de bocana es igual o incluso mayor que el registrado en el exterior. Esto se debe a que se trata de oleaje local alineado con la dirección principal del viento.

Estas diferencias tan notables entre la altura de ola de ambas estaciones cuando el viento procede del NE, se deben a la ubicación de las mismas. Es decir, el oleaje es perpendicular a la línea de costa y la bocana hace de filtro a la zona interior de la bahía. Al contrario, cuando el viento procede del NW entra en la bahía en dirección paralela a la costa sin encontrar impedimento, dando lugar a un oleaje más intenso. En la Figura 26, al solaparse temporalmente los incrementos de altura de ola con los aumentos de turbidez, queda plasmada la importancia que tiene el viento en relación con la resuspensión de sedimentos que provoca un aumento de la turbidez del agua.

#### Temperatura en el fondo

A partir del día 11 de noviembre, las temperaturas en ambas estaciones empiezan a aumentar suavemente hasta alcanzar los 18° el día 18. Se pueden distinguir dos líneas

de comportamiento entre ambas estaciones en relación con la temperatura en el fondo. A pesar de que en los dos puntos sigue la misma tendencia general, en la estación de Bocana el patrón de temperatura es bastante más irregular, presentando oscilaciones diarias más pronunciadas y en periodos de tiempo más cortos. Este hecho puede ser resultado de la menor profundidad en este punto. La zona exterior, al ser más profunda, depende menos de las variaciones de temperatura del aire y de la capa de agua dulce superior, por lo que la temperatura presenta una evolución temporal más regular, con oscilaciones menos pronunciadas.

Por consiguiente, una vez analizadas las variaciones de temperatura en el fondo y los episodios de viento, se podría afirmar que, durante los episodios de levante, las temperaturas generalmente aumentan; mientras que, durante los eventos de viento de Mestral, disminuyen como resultado de una mayor mezcla de agua.

Los días 19 y 20, tal como se observa en el Figura 27, las temperaturas descienden drásticamente (unos 2°C) en cuestión de horas y posteriormente recuperan la temperatura inicial. Este suceso ocurre hasta en tres ocasiones seguidas durante estos días en la zona exterior. Este fenómeno coincide con el episodio descrito anteriormente durante el cual la velocidad en el fondo aumenta hasta superar la velocidad en superficie. Por lo tanto, sabiendo que los días 19-23 aumentó el vertido de agua desde los canales (Figura 19) es interesante considerar la opción de que estas oscilaciones de temperatura e intensidad se deban al paso de esta masa de agua dulce más fría procedente de los canales.

#### [Marea astronómica y marea meteorológica](#)

Gracias al cálculo del factor de forma derivado del análisis de armónicos, se ha podido determinar la marea de la bahía del Fangar como mixta con predominio semidiurno, es decir las dos bajamares y pleamares a lo largo del día presentan una desigualdad variable entre ellas.

Tal como se ha podido observar en la Figura 29, a lo largo del mes la carrera de marea varía, es decir, la distancia entre la marea alta y la marea baja no siempre es la misma. Durante ciertos días la carrera de marea es menos pronunciada (entorno 10 cm), coincidiendo con la fase lunar creciente y menguante, es decir, la marea muerta (día 15 y 30 respectivamente). Por el contrario, los días anteriores y posteriores a la luna nueva y llena (día 7 y 23), la carrera de marea es máxima, momento de marea viva (alcanzando oscilaciones de casi 20cm).

Sabiendo que uno de los principales agentes que generan las seiches es la presión atmosférica, es conveniente relacionar ambas series del mes de noviembre.

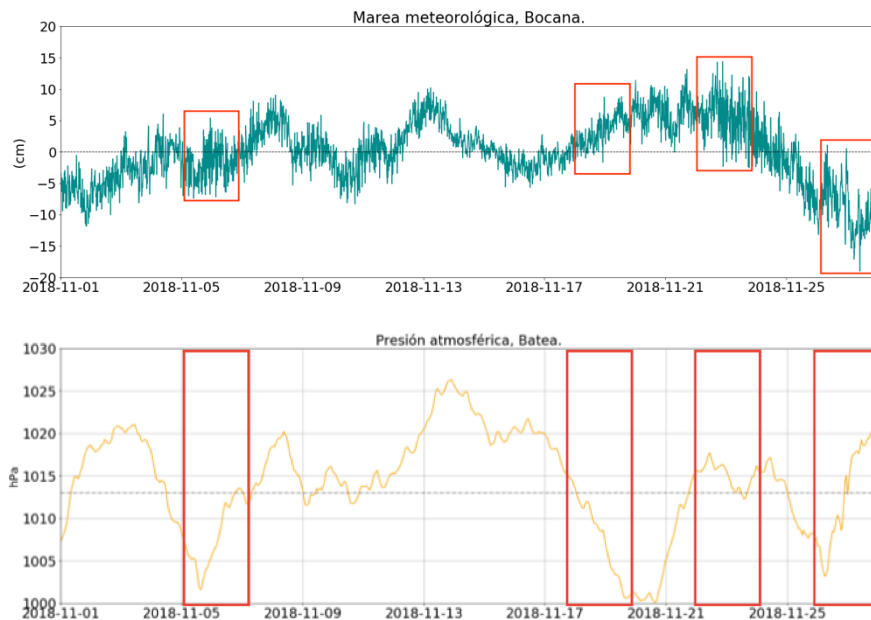


Figura 48 Comparativa marea meteorológica y presión atmosférica en la bahía del Fangar durante el mes de noviembre.

Observando la Figura 48, se puede establecer las causas a priori de los distintos episodios de seiches:

- Primer episodio: descenso de la presión atmosférica.
- Segundo episodio: descenso de la presión atmosférica y evento de viento intenso de Levante.
- Tercer episodio: variación de la presión atmosférica.

- Cuarto episodio: aumento de la presión atmosférica y evento de viento intenso de Mestral.

A lo largo de todos los resultados presentados hasta el momento, se ha manifestado la importancia de la presión atmosférica, que juega un papel determinante en la generación de seiches. Cuando se dan situaciones de bajas presiones (borrascas) el nivel del agua aumenta. Sin embargo, cuando se dan altas presiones (anticiclones) disminuye.

## 6.2. Perfiles verticales

### Temperatura

Al comparar los perfiles de temperatura de los días 8 y 22 de noviembre, se puede observar que el agua en superficie se ha enfriado y en profundidad se ha calentado unos 2°C. Este hecho se debe a que la temperatura del aire ha descendido a lo largo del mes y ha enfriado la capa superficial del agua. La Figura 16 confirma la disminución de la temperatura del aire entre ambos días. Además, estas temperaturas más bajas en la capa superficial pueden ser resultado de la aportación de agua dulce más fría desde los diversos canales de desagüe. Por otro lado, la Figura 27 respalda el aumento de temperatura en el fondo. Como consecuencia del elevado gradiente de temperatura en profundidad, se genera una termoclina muy marcada.

Analizando la distribución espacial, el día 8 se puede observar una disminución de la temperatura a unos 2 metros de profundidad en el punto donde se ubica el canal de desagüe procedente de la estación de bombeo de Bassa de les Olles. Es decir, el agua que se vierte por este punto presenta temperaturas más bajas que el agua de la bahía y al mezclarse reduce la temperatura del agua en esta zona. Por debajo de la superficie, el agua se calienta en función de su penetración en la bahía, osea, hacia el interior de la bahía el agua en profundidad se encuentra más caliente. Esto se debe a que el agua profunda tiene una menor variación de temperatura, es decir, mayor inercia térmica que la superficial. En el transecto de Bocana, en ambos días, la estratificación de la temperatura está más marcada que en transecto del exterior, esto puede ser resultado

de la canalización de las corrientes por el estrechamiento de la sección de paso. Al tener una dirección más definida, las corrientes se mezclan menos y se produce estratificación.

#### Salinidad

La disminución de la salinidad entre los días 8 y 22 de noviembre puede ser consecuencia de los vertidos de agua dulce desde los canales de desagüe anteriores al día 22. Al mezclarse con el agua más salada de la bahía reduce su salinidad. Analizando la distribución espacial, se aprecia más salinidad en superficie en la zona exterior, más expuesta y en contacto con el mar abierto. En cambio, en el interior de la bahía, al mezclarse menos, presenta salinidades en superficie más bajas. Al aumentar la profundidad, en ambos puntos aumenta la salinidad en relación con la superficie. Por lo tanto, se puede diferenciar una capa de agua más dulce superficial y agua salina por debajo de esta.

#### Densidad

Al depender de la temperatura y la salinidad, la disminución de la densidad entre los días 8 y 22 va ligada a una disminución paralela de la salinidad y un aumento de la temperatura, lo que implica que esta disminuya. Por tanto, en términos generales, se puede distinguir una capa superficial más dulce y cálida; y una masa de agua salina y más densa a partir de los 1-2 metros de profundidad. Al igual que en los casos de la temperatura y la salinidad, en el transecto de Bocana la columna de agua está más estratificada que en transecto del exterior.

#### Oxígeno disuelto (OD)

Los vertidos de agua dulce desde los canales de desagüe pueden generar procesos de mezcla y aportar oxígeno al agua de la bahía. La mayor concentración de OD en superficie el día 22 puede ser resultado de la aportación de agua desde los canales los días previos. Por otro lado, también puede ser consecuencia del episodio de viento de levante sucedido entre los días 11 y 19 de noviembre. El viento, moviliza agua salina

hacia dentro de la bahía y propicia movimientos de mezcla, aumentando el OD. Observando la distribución espacial de OD, al aumentar la profundidad se aprecian diferencias entre la zona de la bahía (concentraciones de OD más bajas) y el golfo de la Ampolla (concentraciones más altas). Esto se debe a la entrada de agua marina, más oxigenada, en la zona del golfo.

La hipoxia se produce cuando las concentraciones de oxígeno son inferiores a 2-3 mgO<sub>2</sub>/l [17]. Durante el periodo de estudio no parece que se hayan dado situaciones de hipoxia (el valor mínimo registrado es de 4.5 mgO<sub>2</sub>/l). Sin embargo, al ser un valor cercano y considerando estudios similares en la bahía de los Alfacs [18], es de esperar que, en épocas de menor mezcla vertical, sí se produzcan condiciones de hipoxia en las capas más profundas e interiores de la bahía.

#### Turbidez

Entre los días 8 y 22 de noviembre se produce un incremento de la turbidez resultado de los procesos de mezcla inducidos por el vertido de agua dulce de los canales y por los episodios de viento, que generan oleaje y, a su vez, turbidez. La Figura 26 también registra este aumento de la turbidez entre ambos días. Por otro lado, la Figura 14 respalda la presencia de episodios de viento fuerte días previos a la campaña CTD del día 22; y la figura 19 muestra que entre los días 19-23 se vertieron cantidades importantes de agua desde tierra, lo que también implicaría este incremento en la turbidez.

La zona interior de la bahía presenta valores de turbidez en superficie más bajos, esto se debe a que esta zona está más resguardada de agentes que generen procesos de mezcla y los sedimentos se depositan en las capas más profundas. Los perfiles verticales de turbidez muestran esta mayor estratificación en la zona interior (bocana) en relación con zona exterior.

## 7. Conclusiones y futuras líneas de actuación

Siendo este trabajo uno de los primeros estudios al detalle de la Bahía del Fangar, se han analizado los diversos factores que condicionan su hidrodinámica y la calidad del agua y se han obtenido las siguientes conclusiones.

La bahía del Fangar durante el mes de noviembre, ha estado bajo la influencia de episodios de viento fuerte de Mestral (NW) y Gregal (NE). Como consecuencia de este último, la temperatura del aire a lo largo del mes ha sido más cálida de lo habitual.

En época de canales semiabiertos, el aumento del caudal de agua dulce que se vierte a la bahía del Fangar desde los canales de desagüe, se debe principalmente a la necesidad de evacuar el agua de precipitaciones acumulada sobre la superficie del delta; y a la presencia de borrascas en la zona, que implican la subida del nivel del mar y hacen necesaria la evacuación del agua del mar de los campos de cultivo.

Las aportaciones de agua dulce desde los canales de desagüe de los arrozales son mayores desde las estaciones de Bassa de les Olles e Illa de Mar en comparación con las que se producen desde el canal del Trastellador. Por lo tanto, en estos dos puntos se generan procesos de mezcla que afectan a la hidrodinámica y calidad del agua de la bahía.

Las corrientes más intensas se producen en la bocana de la bahía a causa del estrechamiento de la sección de paso que se produce en este punto. En la columna de agua, son más energéticas en superficie como resultado de la acción del viento, por ello en profundidad pierden intensidad. Los momentos en los que esta configuración se invierte (corrientes a mayor velocidad en el fondo), pueden coincidir con aportaciones de agua dulce desde tierra.

La turbidez del agua depende en gran medida del oleaje y, a su vez, el oleaje depende del viento. En el exterior de la bahía, al ser una zona menos resguardada, se registran picos de oleaje y turbidez más elevados en comparación con los producidos en Bocana.



Por otro lado, en función de la dirección del viento, estas diferencias de intensidad entre ambos puntos serán mayor o menor. En el caso de episodios de viento del NW, en Bocana se generará oleaje local alineado con la dirección principal del viento, por lo tanto, presentará picos de oleaje más intenso.

La temperatura del agua en el fondo presenta un patrón más irregular en el caso de Bocana como consecuencia de una menor profundidad que en Exterior. Los cambios de la temperatura del aire tienen más influencia en puntos con profundidades más bajas. Los momentos en los que se producen cambios bruscos de temperatura en pocas horas pueden ser consecuencia de la presencia de una masa de agua dulce más fría procedente de los canales de desagüe que, tal como se ha podido observar, presenta temperaturas más bajas que la propia agua de la bahía.

La bahía del Fangar presenta una circulación estuárica positiva, el agua del mar entra desde el Golfo de la Ampolla hacia la bahía del Fangar en forma de cuña salina por debajo de una capa de agua más dulce que sale de la bahía.

A lo largo del mes de noviembre se han identificado cuatro episodios de seiches más intensas ligados principalmente a variaciones de la presión atmosférica y a episodios de viento de Levante (disminuye el nivel medio del agua) y Mestral (el nivel medio del agua aumenta). Puesto que son oscilaciones relativamente pequeñas (entorno a los 10 cm) no se considera que afecten de manera significativa a la dinámica de las corrientes en la bahía del Fangar.

Tras estudiar las distribuciones de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y turbidez en la columna de agua, se pudo afirmar que en la bahía del Fangar sí existe estratificación en la columna de agua, más marcada en la zona interior de la bahía.

Finalmente, cabe señalar que el viento, así como los vertidos de agua dulce desde los canales de riego de los arrozales, ejercen una gran influencia en la dinámica y la calidad del agua de la bahía.

En primer lugar, el viento afecta principalmente a la temperatura del aire y, por consiguiente, a la del agua; a las corrientes en superficie; al oleaje, en función de su dirección afecta a una zona u otra; a la turbidez; al nivel del mar como agente generador de seiches; y al oxígeno disuelto del agua, que será mayor cuando genere más mezcla en la columna de agua.

Durante este periodo, la aportación de agua desde los canales, al ser más dulce y fría que la de la bahía, se hunde y afecta a las corrientes en el fondo. Por otro lado, genera procesos de mezcla modificando la temperatura, salinidad y, por tanto, densidad del agua en la zona de mezclado. Es un hecho determinante en la calidad del agua de la bahía ya que puede implicar grandes aportaciones de oxígeno disuelto.

Como futuras líneas de investigación sería interesante registrar de manera más exhaustiva las descargas de agua dulce de los arrozales a la bahía y tratar de relacionar estos aportes con el incremento de velocidad en el fondo hasta valores superiores a la velocidad en superficie; así como las oscilaciones bruscas de temperatura que se producen en ese mismo periodo de tiempo.

## 8. Referencias bibliográficas

### Bibliografía

- [1] P. Cerralbo, M. Espino, J. Cateura y J. Sospedra, *Caracterització de la hidrodinàmica a la Badia del Fangar i Golf de l'Ampolla.*, Barcelona, 2019.
- [2] W. M. Cameron y D. W. Pritchard, *The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas.*, New York: Interscience, 1963.
- [3] V. Molinet Coll, *Recuperación del Delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del Delta del Ebro.*, Barcelona, 2007.
- [4] V. Astoga, E. Fores, E. A. Comin y M. Menendez, *Approach to the characterization of Mediterranean deltaic ecosystems at different scales. Collected Contributions of the Symposium on the Ecology of the Po Rivel Delta.*, 1990.
- [5] J. V. Fernández Colomé, J. Camp Sancho y F. A. Comin, *Los medio acuáticos del delta del Ebro y su capacidad de producción*, 1997.
- [6] E. Pallares Lopez, *Análisis Numérico y Experimental de las "seixas" de las bahías del Delta del Ebro.*, Barcelona: Tesina de especialización. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos., 2010.
- [7] J. M. Franquet Bernis, M. A. Albacar Damian y F. Tallada de Esteve, *Problemática del río Ebro en su tramo final.*, Tortosa, 2017.
- [8] J. Camp y M. Delgado, *Hidrografía de las bahías del delta del Ebro*, Barcelona, 1987.
- [9] J. Serrano Reyes, *Aplicación de un modelo hidrodinámico lineal al estuario del Guadalquivir. Capítulo 1: Introducción general sobre estuarios y mareas.*, Sevilla, 2014.
- [10] A. Rabinovich y S. Montserrat, *Generation of Meteorological Tsunamis (Large Amplitude Seiches) Near the Balearic, Natural Hazards*, 1998.
- [11] C. Ibañez, *Dinàmica hidrològica i funcionament ecològic del tram estuari del riu Ebre.*, Barcelona, 1993.
- [12] M. C. Garcia, *Papel de la interfase sedimento-agua en el reciclado de nutrientes en zonas húmedas.*, Barcelona, 2001.

- [13] E. Forés, *Cicles del nitrogen i del fòsfor en el sistema dels arrossars del delta de l'Ebre.*, Barcelona, 1989.
- [14] Servei Meteorològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat., *Bulletí climàtic mensual.*, Novembre del 2018. .
- [15] P. Cerralbo, M. Espino, J. Cateura y J. Sospedra, *Circulació de la badia del Fangar per a la gestió de les activitats d'aqüicultura i marisqueig.*, Barcelona: Fons Europeu i Marítim de la Pesca (FEMP), 2017.
- [16] U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, *Tide and Current Glossary*, Silver Spring, MD, 2000.
- [17] P. Cerralbo, M. Grifoll y M. Espino, *Hydrodynamic response in a microtidal and shallow bay under energetic wind and seiche episodes.*, 2015.
- [18] R. J. Diaz y D. L. Breitburg, *The hypoxic environment*, 2009.
- [19] J. Camp, *Aproximaciones a la dinámica estuarica de una bahía micromareal Mediterránea. Thesis. Universitat de Barcelona.*, Barcelona, 1994.
- [20] F. C.T., *Applications of Scaling in Coastal/Estuarine Physical Oceanography: 13*, 2002a.
- [21] X. Pedro Puente, *Situacions d'anòxia en zones estuàriques sense forçament mareal.*, 2007.

#### Webgrafia

- [www.mapa.gob.es](http://www.mapa.gob.es) [última consulta: Marzo 2019]
- <http://agricultura.gencat.cat/ca/inici/> [última consulta: Marzo 2019]
- [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps) [última consulta: Abril 2019]
- <http://parcsnaturals.gencat.cat/es/> [última consulta: Abril 2019]
- [www.meteocat.com](http://www.meteocat.com) [última consulta: Mayo 2019]
- <https://upcommons.upc.edu> [última consulta: Mayo 2019]
- <http://diposit.ub.edu/dspace/> [última consulta: Mayo 2019]
- [www.matplotlib.org](http://www.matplotlib.org) [última consulta: Junio 2019]
- [www.github.com](http://www.github.com) [última consulta: Junio 2019]

## 9. ANEXOS

Estadillos utilizados para la anotación de las horas de funcionamiento de la estación de bombeo de Bassa de les Olles.

ESTACIÓ DE BOMBEIG OLLES MES <u>NOVEMBRE</u> ANY <u>2018</u>					
DIA	LECTURES FUNCIONAMENT DEL CARGOL				NOTES
	NÚM. 1	NÚM. 2	NÚM. 3	NÚM. 4	
01	15799	12845	09444	06302	
02	15868	12966	09421	06302	
03	15833	12909	09465	06302	
04	15846	12922	09465	06302	
05	15859	12935	09468	06302	
06	15842	12948	09473	06304	
07	15884	12960	09475	06307	
08	15893	12969	09474	06311	
09	15904	12979	09480	06311	
10	15911	12910	09482	06313	
11	15915	12989	09484	06324	
12	15924	12995	09495	06334	
13	15924	13001	09800	06334	
14	15924	13009	09802	06334	
15	15929	13014	09811	06342	
16	15934	13024	09822	06352	
17	15934	13038	09824	06352	
18	15934	13042	09832	06352	
19	15941	13052	09838	06354	
20	15965	13046	09862	06381	
21	15989	13100	09885	06405	
22	15999	13110	09888	06406	
23	16009	13120	09891	06408	
24	16018	13114	09893	06409	
25	16024	13137	09894	06410	
26	16035	13146	09895	06412	
27	16034	13169	09909	06413	
28	16034	13184	09909	06413	
29	16034	13198	09909	06413	
30					
31					

Estadillos utilizados para la anotación de las horas de funcionamiento de la estación de bombeo de Illa de Mar.

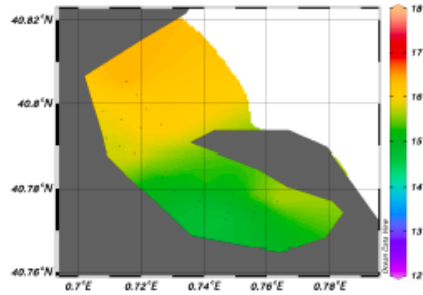
ESTACIÓ DE BOMBEIG ILLA DE MAR MES <u>NOVEMBRE</u> ANY <u>2018</u>					
DIA	LECTURES FUNCIONAMENT DEL CARGOL				NOTES
	NÚM. 1	NÚM. 2	NÚM. 3	NÚM. 4	
01	25658	25523	25393	20105	
02		25591	25412	20113	
03		25603	25420	20121	
04		25611	25425	20124	
05		25615	25429	20126	
06	25665	25626	25439		
07		25632	25445		
08		25635	25450	20128	
09		25644	25456		
10		25650	25464	20130	
11		25653	25468	20131	
12		25655	25473		
13	25670	25660	25478	20135	
14	25678	25667	25485	20138	
15	25680	25669	25486	20139	
16	25684	25674			
17	25689	25678	25491	20144	
18	25692	25690	25502	?	
19	25692	25696	25502	20148	
20	25719	25710	25521	20170	
21	25735	25716	25545	20174	
22			25546	20187	
23	25751	25736	25568		
24	25758	25743	25572		
25	25763	25742	25582		
26	25770	25754	25587		
27	25784	25773	25592	20205	
28	25	25775	25592	20207	
29					
30					
31					

Distribución espacial de la temperatura a diferentes profundidades:

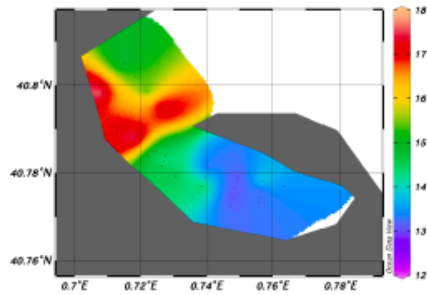
DÍA 8

DÍA 22

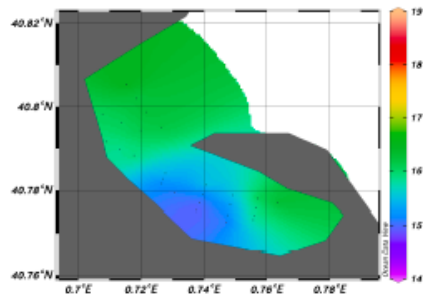
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



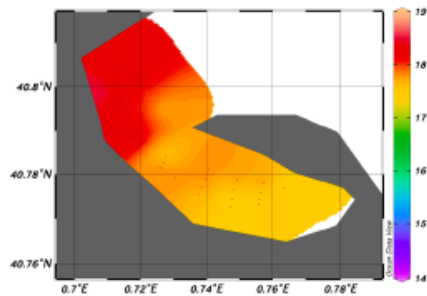
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



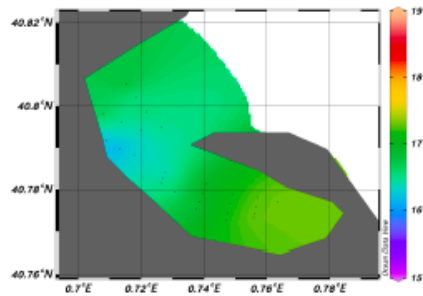
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



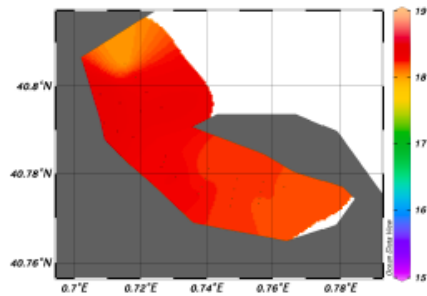
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



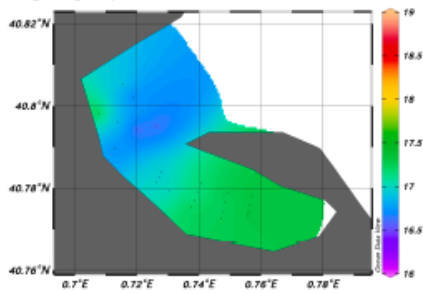
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



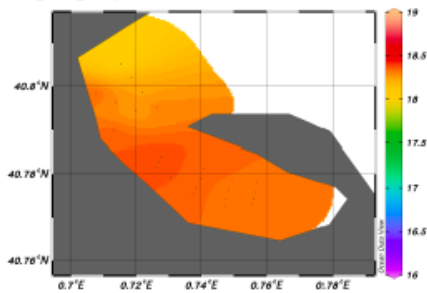
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



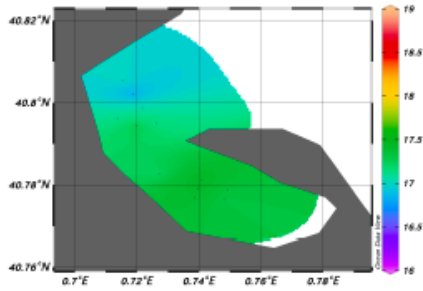
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



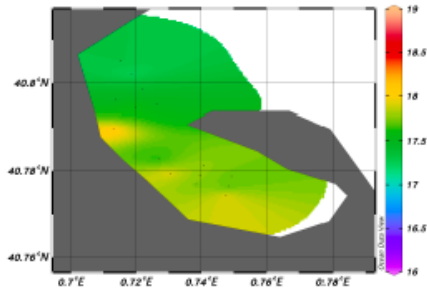
Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00



Temperature [ITS-90, deg C] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00

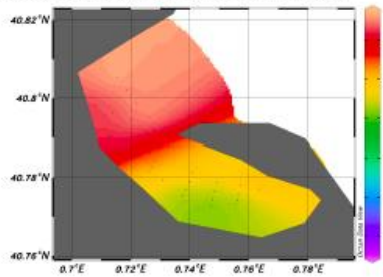


Distribución espacial de la salinidad diferentes profundidades:

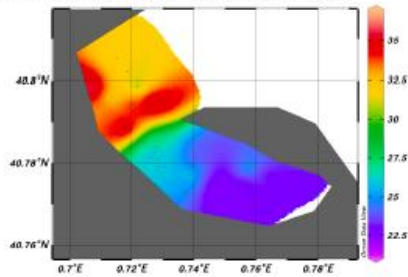
**DÍA 8**

**DÍA 22**

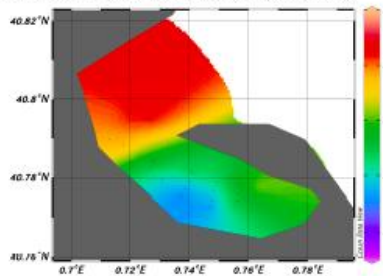
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



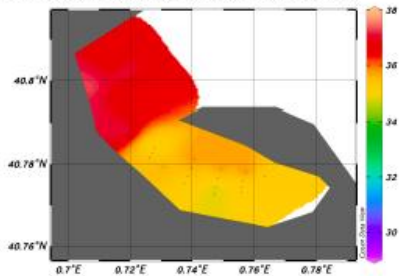
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



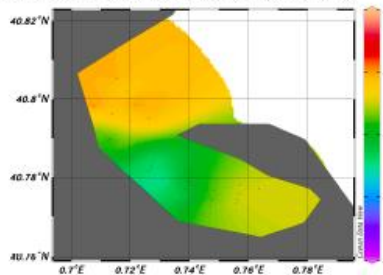
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



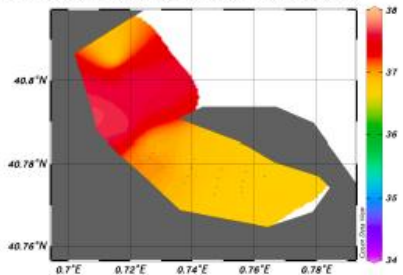
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



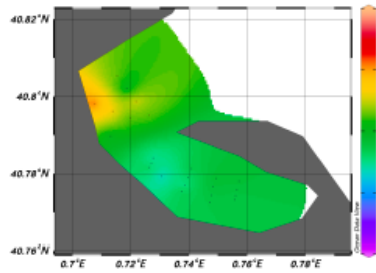
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



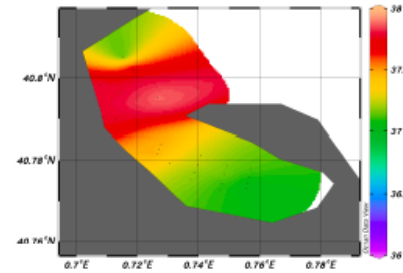
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



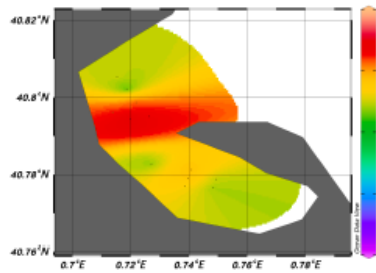
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



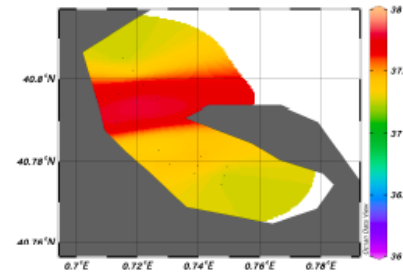
Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00



Salinity, Practical [PSU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00



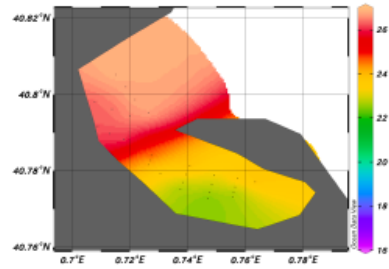


Distribución espacial de la densidad a diferentes profundidades:

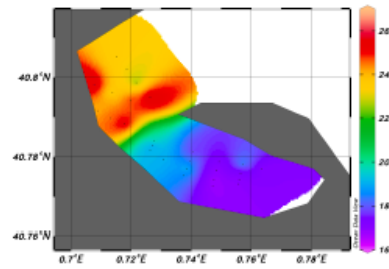
**DÍA 8**

**DÍA 22**

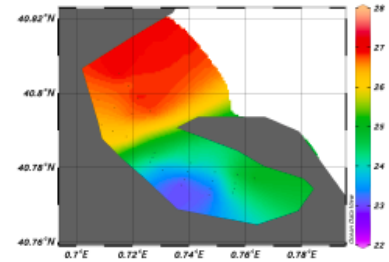
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=0.40



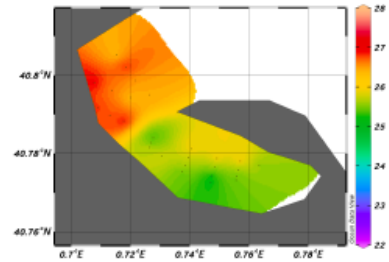
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=0.40



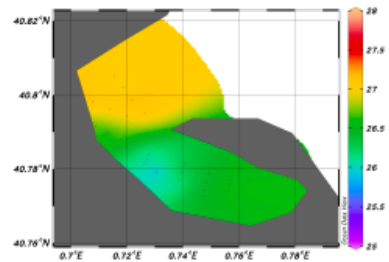
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=1.00



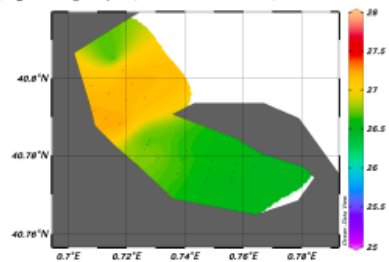
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=1.00



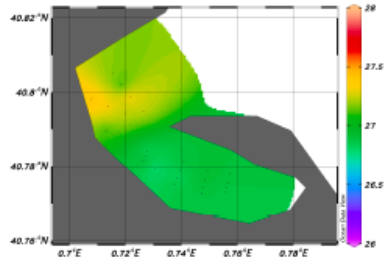
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=2.00



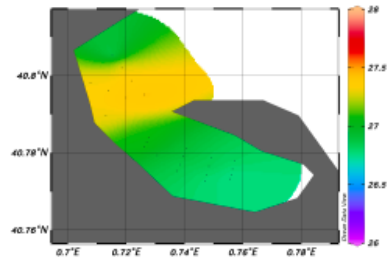
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=2.00



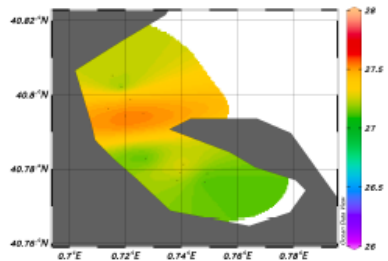
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=3.00



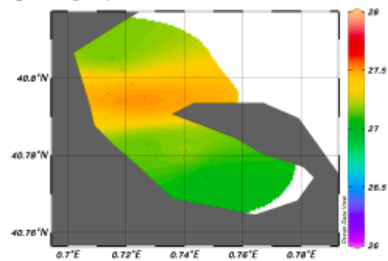
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=3.00



Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=4.00



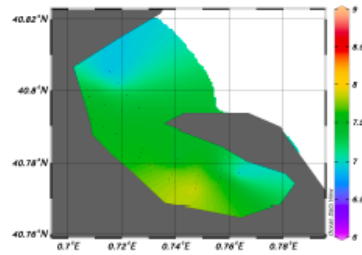
Density [ $\sigma_t$ , kg/m<sup>3</sup>] @ Depth, lat = 40 [salt water, m]=4.00



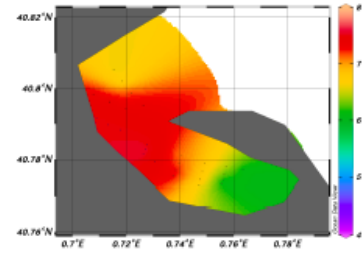
Distribución espacial del oxígeno disuelto a diferentes profundidades:

**DÍA 8**

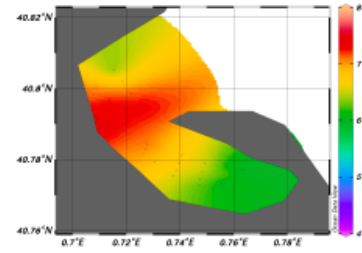
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



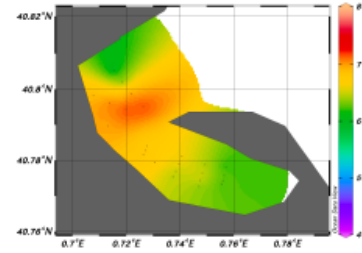
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



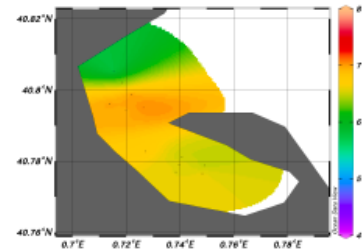
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00

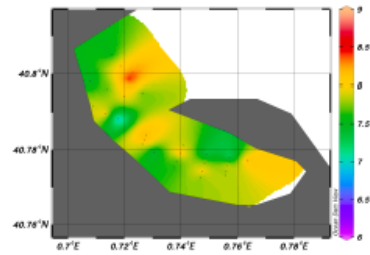


Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00

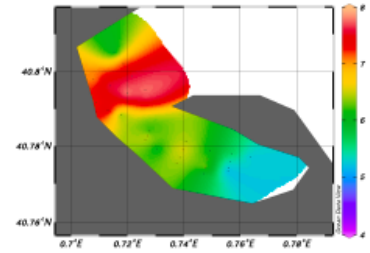


**DÍA 22**

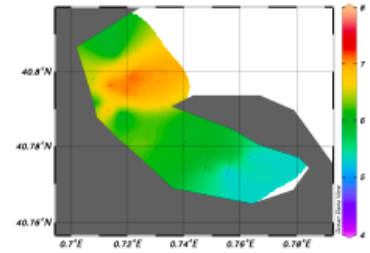
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



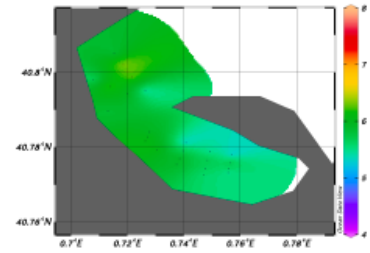
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



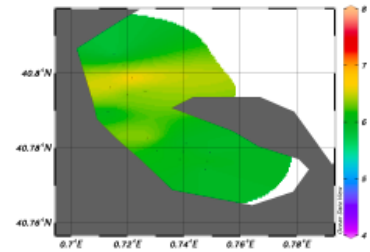
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



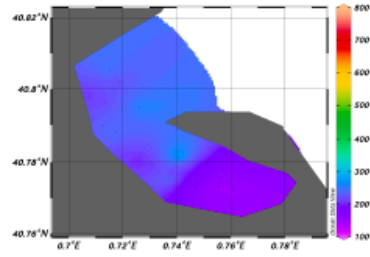
Oxygen, SBE 43 , WS = 2 [mg/l] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00



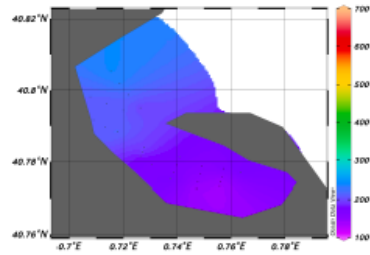
Distribución espacial de la turbidez a diferentes profundidades:

**DÍA 8**

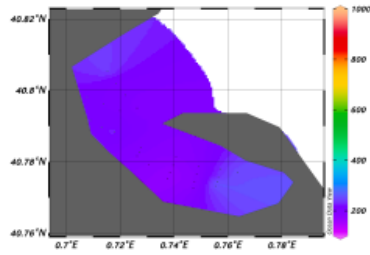
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



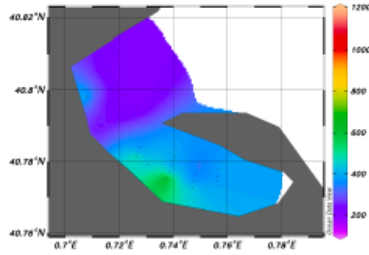
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



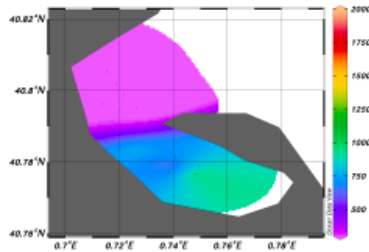
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00

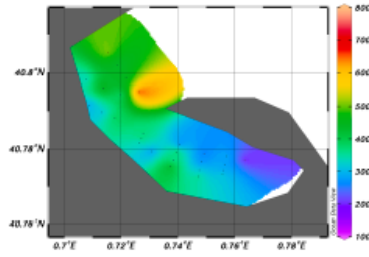


Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00

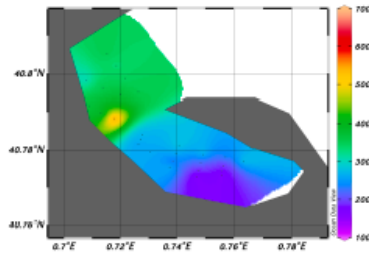


**DÍA 22**

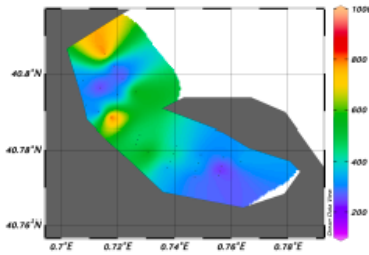
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=0.40



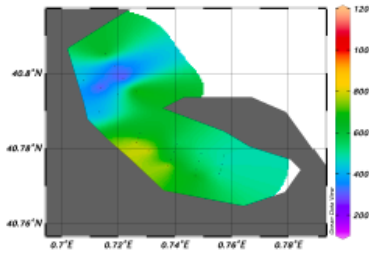
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=1.00



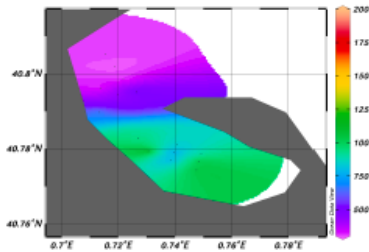
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=2.00



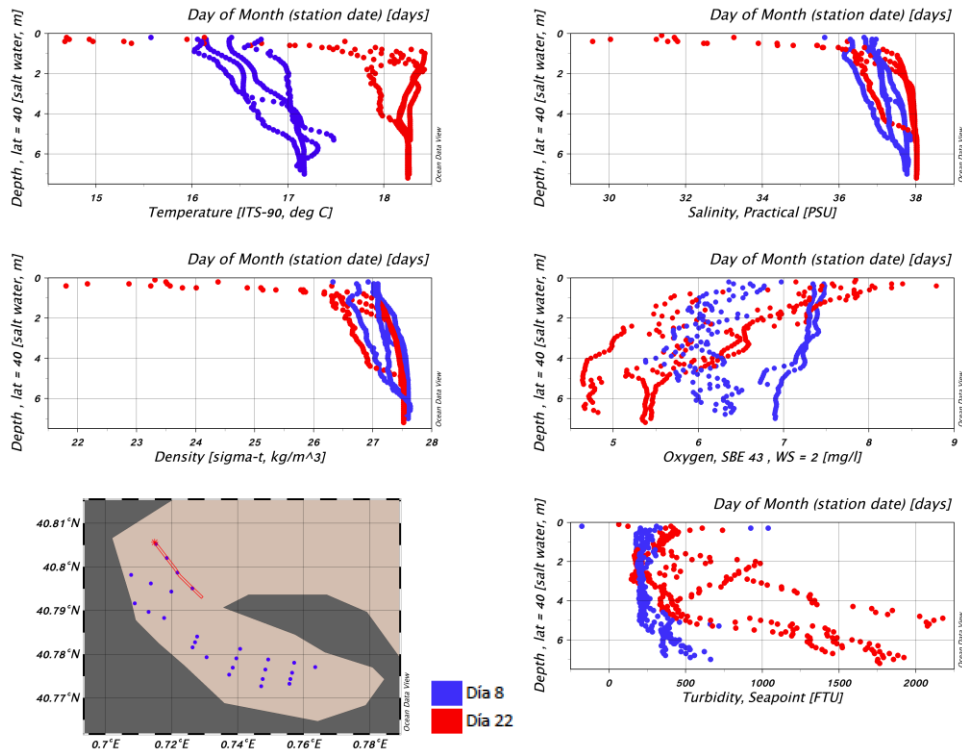
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=3.00



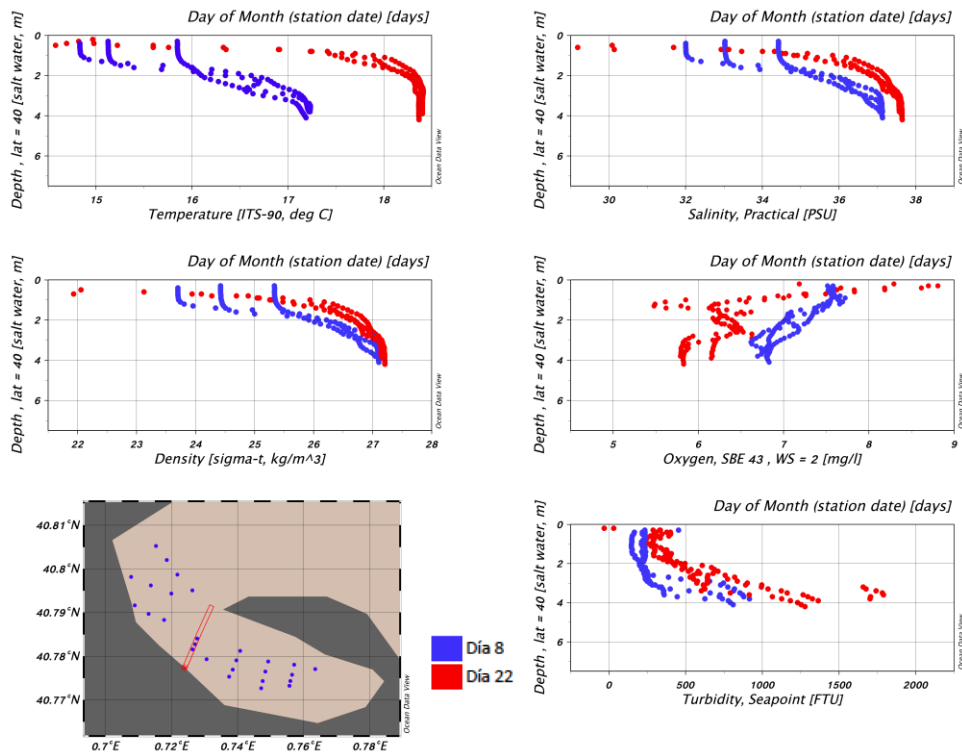
Turbidity, Seapoint [FTU] @ Depth , lat = 40 [salt water, m]=4.00



### Perfiles CTD transecto exterior.

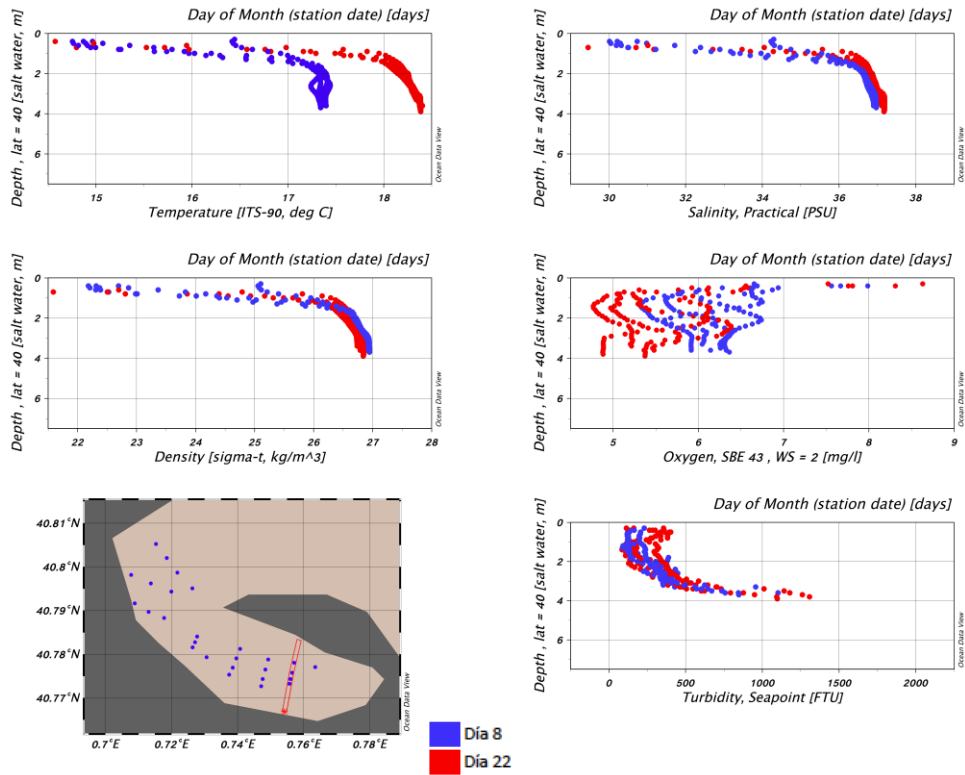


### Perfiles CTD transecto bocana.

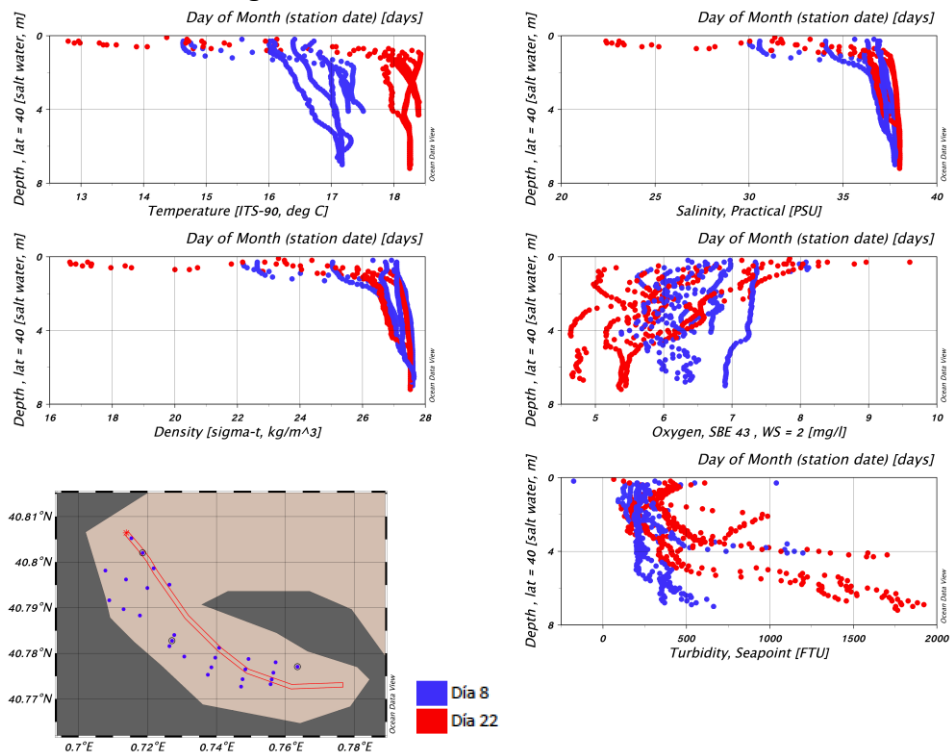


### Perfiles CTD transecto interior.

## Análisis experimental de la hidrodinámica y calidad de las aguas en la Bahía del Fangar

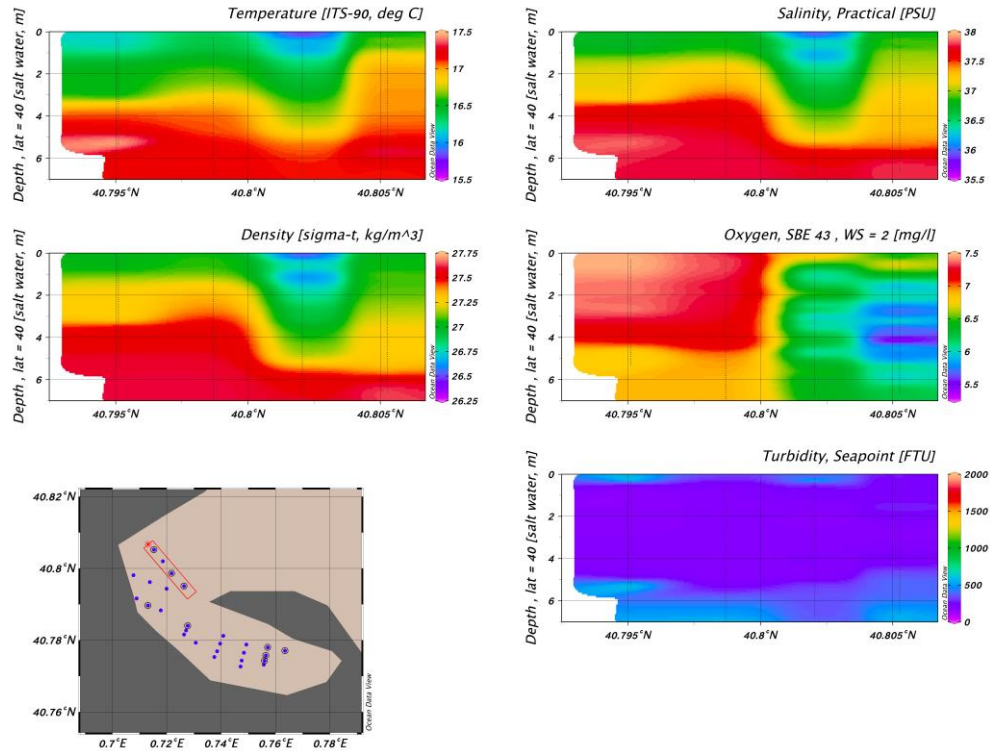


## Perfiles CTD transecto longitudinal.

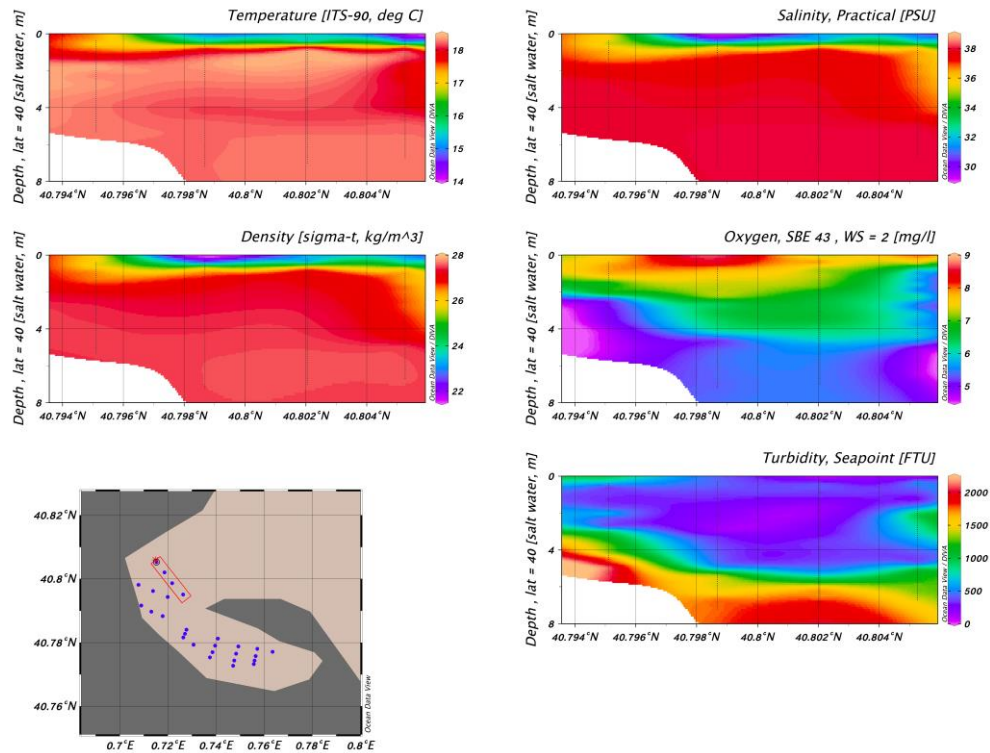


## Sección vertical transecto exterior

### DÍA 8

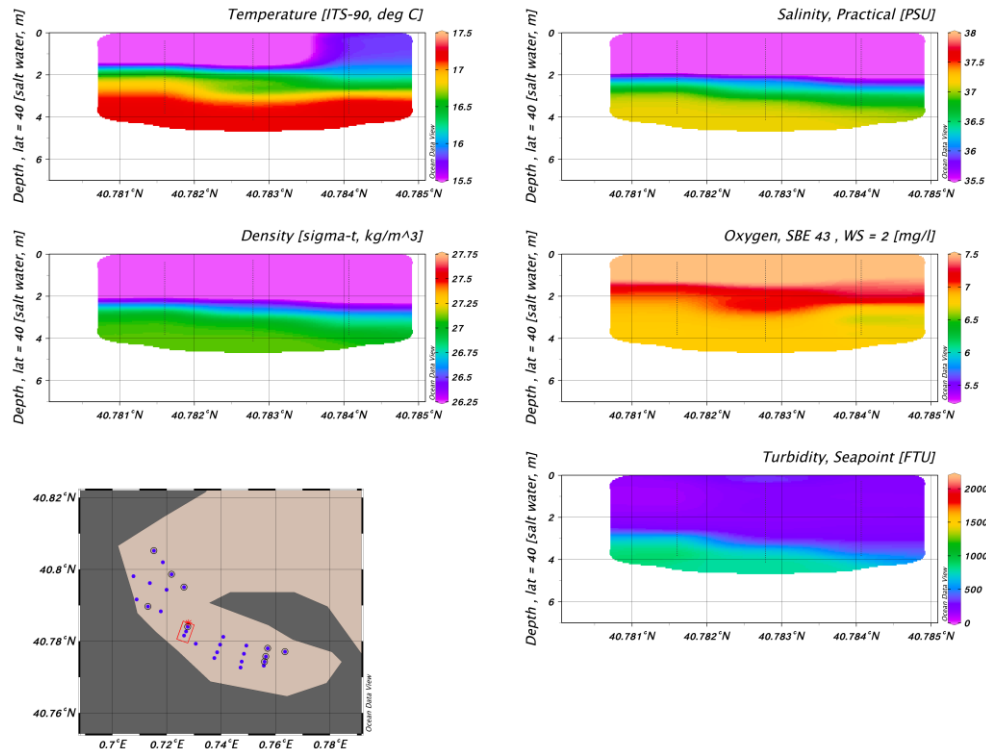


### DÍA 22

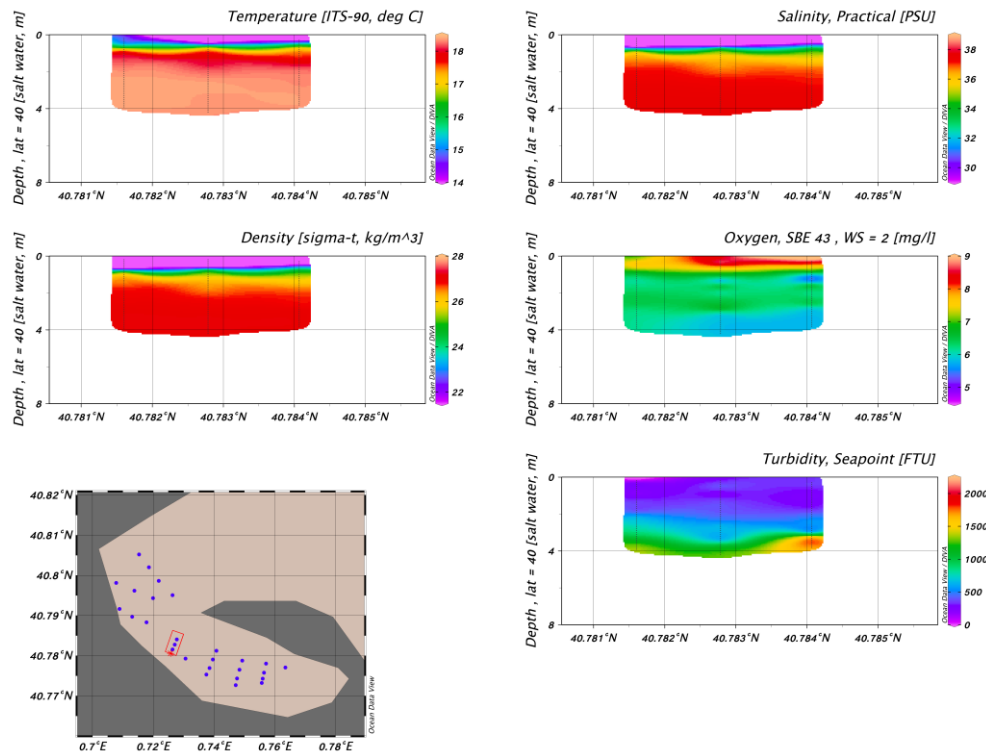


## Sección vertical transecto bocana

### DÍA 8



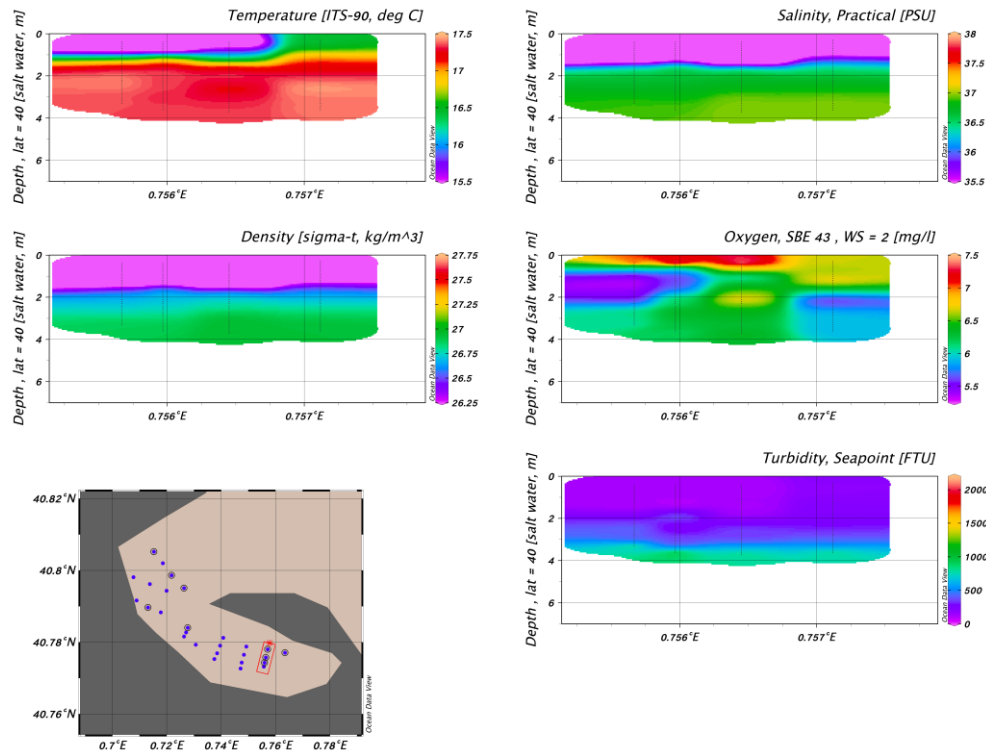
### DÍA 22



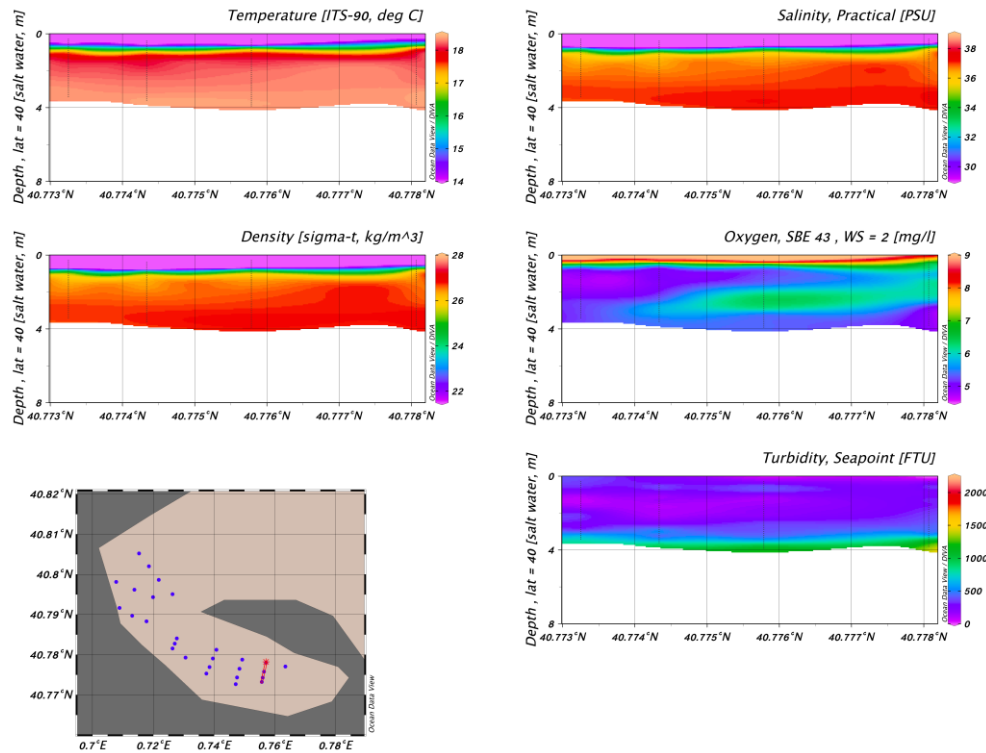


## Sección vertical transecto interior

### DÍA 8



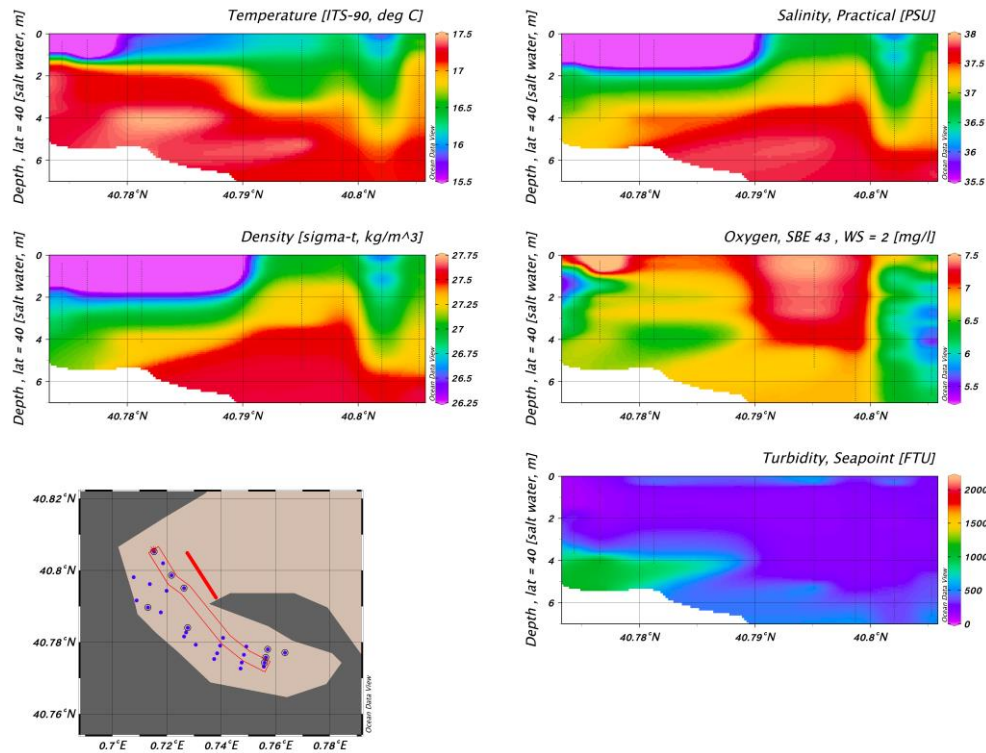
### DÍA 22





## Sección vertical transecto longitudinal

### DÍA 8



### DÍA 22

